



Pro gradu-tutkielma  
Geofysiikka

1980 -LUVULLA TEHTYJEN MERENPINNAN NOUSUSKENAARIOIDEN  
OSUVUUS

Katri Leinonen

9. huhtikuuta 2019

Ohjaajat: Tutkimusprofessori Kimmo Kahma

Tarkastajat: Professori Petteri Uotila  
Tutkimusprofessori Kimmo Kahma

HELSINGIN YLIOPISTO  
Ilmakehätieteiden keskus (INAR)

PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2)  
00014 Helsingin Yliopisto

Tiedekunta — Fakultet		Laitos — Institution	
Matemaattis-luonnontieteellinen		Ilmakehätieteiden keskus (INAR)	
Tekijä — Författare			
Katri Leinonen			
Työn nimi — Arbetets titel			
1980-luvulla tehtyjen merenpinnan noususkenaarioiden osuvuus			
Oppiaine — Läroämne			
Geofysiikka			
Työn laji — Arbetets art		Aika — Datum	Sivumäärä — Sidoantal
Pro gradu -tutkielma		26.3.2019	54 s.
Tiivistelmä — Referat			
<p>Globaalille valtamerten pinnanousulle on viimeisen 40 vuoden aikana julkaistu suuri määrä mahdollisia tulevaisuuskuvia, skenaarioita. Tässä pro gradu –työssä tarkastellaan kahdeksan 1980–luvulla tehdyn merenpinnan noususkenaarion osuvuutta vertaamalla skenaarioita toteutuneeseen valtameren pinnannousuun. Globaalia merenpinnan muutosta on mitattu viimeisten parin vuosisadan aikana mareografimittauksilla eri puolella maailmaa. Vuodesta 1993 alkaen globaalin merenpinnan korkeusaineistoa on tarjolla myös satelliittimittauksista. Tässä työssä merenpinnan nousun vertailutasona on käytetty kummallakin mittausmenetelmällä tehtyjä merenpinnan nousuaikasarjoja. Jotta noususkenaariot ja mittausaikasarjat olisivat keskenään vertailukelpoisia, valittiin yhteiseksi aloitusvuodeksi 1980. Kaikkien merenpinnan noususkenaarioiden ja mittausaikasarjojen nolлатaso siirrettiin alkamaan tästä vuodesta. Globaalit ilman lämpötilan noususkenaariot ovat kiihtyviä, ja yleisesti myös merenpinnan noususkenaarioiden oletetaan olevan kiihtyviä. Merenpinnan noususkenaarioihin, joille ei ollut annettu merenpinnan nousun väliarvioita, sovitettiin toisen asteen yhtälön mukainen kiihtyvyys. Muihin skenaarioihin sovitettiin kaikkien annettujen välipisteiden kautta kulkeva käyrä.</p> <p>Tässä työssä tarkastellut merenpinnan noususkenaariot poikkeavat toisistaan huomattavasti alimpien skenaarioiden ennustaessa parinkymmenen sentin merenpinnan nousua ja ylimpien skenaarioiden jopa useiden metrien nousua. Vuonna 2018 kaikkien skenaarioiden keskiarvo on noin 6 cm toteutuneen merenpinnan nousun yläpuolella, nousua vuodesta 1980 on tapahtunut noin 10 cm. Toteutunut merenpinnan nousu on myös selvästi skenaarioiden mediaanin alapuolella. Vajaa 70 % skenaarioista nousee nopeammin kuin vedenkorkeus on todellisuudessa noussut. Suomen rannikolla, Hangossa, merenpinnan noususkenaarioiden perusteella tehty ennuste on 2010–luvulla muutamia senttimetriä mitatun merenpinnan yläpuolella.</p> <p>Merenpinnan noususkenaariot ovat vuosien varrella kehittyneet, mutta perustuvat edelleen paljolti samoihin tai samankaltaisiin menetelmiin kuin 1980–luvulla tehdyt merenpinnan noususkenaariot. Tämän takia on hyödyllistä tarkastella 1980–luvulla käytettyjä menetelmiä, niiden taustalla olevia oletuksia ja niistä saatujen ennusteiden osuvuutta. Tässä työssä tarkastellut merenpinnan noususkenaariot jaettiin tekomenetelmän mukaan kahteen pääryhmään. Toinen ryhmä koostui merenpinnan nousuun vaikuttavien osatekijöiden arviointiin perustuvista noususkenaarioista. Toisessa ryhmässä olivat semi–empiiriset skenaariot, joissa merenpinnan muutosta arvioidaan jonkin ilmastollisen suureen perusteella. Merenpinnan noususkenaarioista valittiin parhaiten vuosien 1980–2018 merenpinnan nousua kuvaavat skenaariot. Parhaiten osuvissa skenaarioissa oli laaja kirjo eri menetelmillä tehtyjä ja erilaisiin oletuksiin perustuvia skenaarioita. Merkittävää osuvuuseroa ei kahdella eri päämenetelmällä tehtyjen skenaarioiden välillä löydetty.</p>			
Avainsanat — Nyckelord			
Merenpinnan noususkenaariot, Globaali merenpinnan nousu, 1980–luku			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe			
Kumpulan tiedekirjasto, Helsingin yliopisto			
Muita tietoja — övriga uppgifter			

# Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Merenpinnan muutokset ja niiden mittaaminen</b>	<b>3</b>
2.1	Muuttuva merenpinta . . . . .	3
2.2	Merenpinnan muutokset Itämerellä . . . . .	6
2.3	Merenpinnan korkeuden mittaaminen . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Merenpinnan noususkenaariot ja -mittausaikasarjat</b>	<b>9</b>
3.1	Merenpinnan noususkenaariot . . . . .	9
3.1.1	Lähdeartikkelit . . . . .	10
3.2	Globaalin merenpinnan korkeuden mittausaikasarjat . . . . .	19
3.2.1	Aikasarja vuosille 1700–2002 . . . . .	19
3.2.2	Aikasarja vuosille 1880–2013 ja vuosille 1993 – 2014 . . . . .	19
3.2.3	Aikasarja vuosille 1993–2018 . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Menetelmät</b>	<b>23</b>
4.1	Merenpinnan nousun lähtötason valinta . . . . .	23
4.2	Merenpinnan noususkenaarioiden käsittely . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Tulokset ja keskustelu</b>	<b>31</b>
5.1	Ääri- ja keskiskenaariot . . . . .	34
5.2	Skenaarioiden ryhmittely tyyppin mukaan . . . . .	38
5.2.1	Semi-empiiriset skenaariot . . . . .	39
5.2.2	Tekijöittäin arvioidut skenaariot . . . . .	39
5.3	Parhaimmat osuvuudet . . . . .	45
5.4	Itämeren merenpinnan noususkenaariot . . . . .	46
<b>6</b>	<b>Johtopäätökset</b>	<b>49</b>
	<b>Kirjallisuusviitteet</b>	<b>51</b>



# 1

## Johdanto

Globaali merenpinta on ollut nousussa kuluneen vuosisadan (1901–2010) aikana noin  $1,7 \pm 0,2$  mm/v (Church et al., 2013). Viimeisten kymmenien vuosien aikana nousu on ollut kiihtyvää. Satelliittimittaukset antavat merenpinnan nousunopeudeksi vuosien 1993 ja 2018 välille noin  $3 \pm 0,4$  mm/v (Nerem et al., 2018). Nykytiedon mukaan viimeisimpien vuosikymmenten nousu aiheutuu pääasiassa meriveden lämpölaajenemisesta ja pienten vuoristojäätiköiden sulamisesta. Etelämantereen ja Grönlannin jäätiköiden vaikutus merenpinnan nousuun on kuitenkin kasvanut 1990-luvun alusta lähtien (Church et al., 2013).

Valtamerten pinnannousulle on viimeisen 40 vuoden aikana julkaistu suuri määrä tulevaisuuden merenpinnan tasoa arvioivia skenaarioita. Vielä 1980-luvulla tehdyistä skenaariosta ylimmät skenaariot ennustivat useiden metrien nousua ja alimmat skenaarioiden merenpinnan laskevan. Merenpinnan noususkenaarioiden vaihteluväli on jonkin verran kaventunut vuosikymmenien kuluessa, mutta se on edelleen laaja, ja muodostaa tärkeimmän epävarmuustekijän rannikkorakentamisen suunnittelussa niin Suomessa kuin muuallakin maailmassa. Tiedot merenpinnan nousuun vaikuttavista tekijöistä ja prosesseista ovat vuosikymmenten varrella tarkentuneet. Merenpinnan noususkenaariot perustuvat kuitenkin edelleen paljolti samankaltaisiin menetelmiin kuin 1980-luvulla.

Nousuennusteilla on tieteellisen mielenkiinnon lisäksi myös käytännön merkitys. Suomessa globaalien merenpinnan noususkenaarioiden sekä Suomen rannikon vedenkorkeusvaihteluiden ja ominaispiirteiden perusteella määritellään rannikkoalueelle alimmat suositeltavat rakennuskorkeudet ja meritulvariskitasot (Kahma et al., 2014). Tulevaa merenpinnan nousua Suomen rannikolla arvioidaan muodostamalla todennä-

köisyysjakauma globaalien merenpinnan noususkenaarioiden perusteella. Jakaumaa voidaan tarkentaa painottamalla hyväksi todetuilla menetelmillä tehtyjä noususkenaarioita (Pellikka et al., 2018). Hyvien menetelmien arvioimiseksi on hyödyllistä tarkastella 1980-luvulla käytettyjä menetelmiä, niiden taustalla olevia oletuksia sekä noususkenaarioiden osuvuutta.

Tässä pro gradu -työssä tarkastellaan 1980-luvulla tehtyjen merenpinnan noususkenaarioiden osuvuutta vertaamalla niiden tuloksia toteutuneeseen valtamerten pinnan nousuun. Vuonna 1990 silloinen Merentutkimuslaitos laati selvityksen otsikolla 'Meriveden korkeus, aallot, lämpötila, suolaisuus ja biologinen kasvusto Loviisan rannikolla seuraavien 20–50 vuoden aikana' (Kahma et al., 1990). Selvityksen pohjaksi tehtiin laaja kirjallisuuskatsaus 1980-luvulla tehdyistä tutkimuksista, jotka käsittelivät merenpinnan noususkenaarioita. Tässä tutkielmassa käsitellään tarkemmin seitsemää kirjallisuusselvitykseen poimittua artikkelia. Lisäksi mukaan on otettu hallitustenvälisen ilmastopaneeli IPCC:n ensimmäisessä arviointiraportissa annetut merenpinnan noususkenaariot (Warrick ja Oerlemans, 1990). Tämän työn tavoitteena on verrata 1980-luvulla tehtyjä merenpinnan noususkenaariota vuoteen 2018 mennessä toteutuneeseen merenpinnan nousuun ja saada käsitys eri tyyppisten skenaarioiden tarkkuudesta. Lisäksi tutkimuksen tarkoituksena on selvittää voiko tarkastelun perusteella antaa suosituksia nykyisten skenaarioiden painotukseen merenpinnan nousuennusteita Suomen rannikolle tehtäessä.

# 2

## Merenpinnan muutokset ja niiden mittaaminen

### 2.1 Muuttuva merenpinta

Merenpinta on jatkuvassa muutoksessa ja merta seuratessa huomio kiinnittyy ensimmäisenä aallokkoon. Aallokko on kuitenkin vain nopeaa heilahtelua merenpinnan keskimääräisen korkeuden ympärillä, ja merenpinnan korkeudesta puhuttaessa aallokkoa ei huomioida. Tunteja tai päiviä merta seuratessa tulee esille merenpinnan korkeuteen lyhyessä aikaskaalassa vaikuttavat seikat: vuorovesi ja meteorologiset tekijät. Paikallisesti lyhytkestoiset merenpinnan muutokset ovat merkittäviä, joiden tunteminen on yhteiskunnallisesti tärkeää.

Itämerellä merenpinnan lyhytkestoiset vaihtelut johtuvat pääosin meteorologisista tekijöistä eli ilmanpaineen ja tuulen vaihtelusta. Tuuli työntää vettä Itämerellä alueilta toisille ja pakkaa sitä lahtien pohjukoihin. Suomen rannikolla pakkautumista voi olla useita kymmeniä senttimetrejä (Hela, 1948; Lisitzin, 1974) ja Suomenlahden itäpäässä vielä enemmän (S. Averkiev ja A. Klevanny, 2010). Ilmanpaine vaikuttaa vedenkorkeuteen niin kutsutun käänteisen ilmanpainevaikutuksen kautta. Korkeapaineen alueella merenpintaa laskee ja matalapaineen alueella merenpinta nousee. Valtamerillä yhden hehtopascalin muutos ilmanpaineessa vastaa noin senttimetrin muutosta vedenkorkeudessa (Defant, 1961a). Itämerellä tilanne on tätä monimutkaisempi. Kapeat Tanskan salmet hidastavat merkittävästi veden vaihtumista Itämeren ja Pohjanmeren välillä, jolloin käänteinen ilmanpainevaikutus rajoittuu Itämeren alueen paikallisiin ilmanpaine-eroihin. Meteorologiset tekijät aiheuttavat siis korkeuseroja eri Itämeren

osien välillä. Painovoiman pyrkii kuitenkin tasapainottamaan tilannetta, jolloin vedenpinta lähtee heilahtelemaan tasapainotilan ympärillä ja näin synnyttää Itämerelle ominaisheilahtelua (Lisitzin, 1974; Wubber ja Krauss, 1979). Meteorologiset tekijät Tanskan salmien alueella vaikuttavat myös Itämeren kokonaisvesimäärään säätelemällä veden virtausta Tanskan salmien läpi (Lisitzin, 1962; Andersson, 2002; Johansson et al., 2001; Johansson ja Kahma, 2016). Lisäksi vedenkorkeuteen vaikuttaa edellisiä tekijöitä pienemmässä määrin Itämerellä syntyvä vuorovesi (Witting, 1911; Defant, 1961b; Medvedev et al., 2013).

Globaaleissa merenpinnan noususkenaarioissa lyhytkestoiset muutokset kuitenkin sivuutetaan, jolloin pääosassa ovat pitkäkestoiset merenpinnan muutokset – meriveden tilavuuden ja valtamerten kokonaisvesimäärän muutokset. Lyhytkestoiset muutokset on kuitenkin otettava huomioon, kun havaintoja verrataan skenaarioihin.

### **Meriveden tilavuusmuutokset**

Meriveden tilavuuden muutos aiheutuu pääasiassa meriveden lämpölaajenemisesta. Paikallisesti myös meriveden suolaisuuden muutokset voivat vaikuttaa tilavuuteen merkittävästi, mutta globaalin merenpinnan nousun kannalta suolaisuusmuutosten tiheysvaikutus ja tätä kautta vaikutus tilavuuteen on pieni. Meriveden tiheys eri tekijöiden muuttuessa saadaan meriveden tilayhtälöstä. Nykyään voimassa oleva tilayhtälö on TEOS-10 (IOC et al., 2010).

Meren pintakerros absorboi ilmasta tulevaa lämpösäteilyä ja lämmenneen pintakerroksen lämpö siirtyy meren alempiin kerroksiin advektion ja turbulenttisen diffuusion kautta. Merten ylin 700 metrin kerros on tutkimusten mukaan lämmennyt vuodesta 1971 vuoteen 2010. Tämä lämpeneminen on aiheuttanut noin  $0,6 \pm 0,2$  mm/v merenpinnan nousun; joka on noin 30% merenpinnan kokonaisnoususta samalta ajalta. Ennen vuotta 1971 lämpötilamittauksia ei ole tehty tarpeeksi (paikalliseen ja ajalliseen) luontaiseen vaihteluun nähden, jolloin havainnoista ei voida saada luotettavia tuloksia. Suurin osa lämpölaajenemisvaikutuksesta onkin viimeisten vuosikymmenten aikana tullut meren ylimmän 700 metrin lämpölaajenemisesta. Tutkimusten mukaan myös 700–2000 metrin kerros on todennäköisesti lämmennyt ja vaikuttaa merenpinnan nousuun noin 0,13 mm vuodessa (Levitus et al., 2012). Syvän meren kerrosten lämpötiladataa on käytettävissä historiallisesti vain vähän, mikä aiheuttaa epävarmuutta syvän meren lämpölaajenemisvaikutuksen arviointiin, varsinkin mittauksia yli 2000 metrin syvyydeltä on vain harvoilta alueilta. (Church et al., 2013; Rhein et al., 2013)

### **Meren kokonaisvesimäärän muutos**

Kokonaisvesimäärän muutoksen määrittää pääasiassa jäätiköiden menettämä jään määrä, joko sulannan tai mannerjäätiköiltä purkautuvien jäävuorien muodossa. Globaa-



leissa merenpinnan noususkenaarioissa jäätiköiden vaikutus annetaan usein kolmessa luokassa: Etelämanner, Grönlanti ja pienet jäätiköt. Pienten jäätiköiden sulaminen on tällä hetkellä meriveden lämpölaajenemisen ohella suurin merenpinnan nousuun vaikuttava tekijä. Pienten jäätiköiden sulaminen, muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta, on alkanut jo 1900-luvun alussa, sulaminen on kiihtynyt viimeisimpien vuosikymmenten aikana (Meier, 1984; Meier et al., 2007; Church et al., 2013). Vuosina 2003–2009 kaikkien pienten jäätiköiden vaikutus merenpinnan nousuun noin  $0,71 \pm 0,08$  mm/v (Church et al., 2013).

Mannerjäätiköiden massataseen ja ilmastomuutosten välinen yhteys on mutkasta, sillä ilmastomuutos toisaalta lisää jäätiköiden pinnalla tapahtuvaa sulantaa, mutta voi toisaalta kasvattaa sadantaa jäätiköille kasvattaen näin jäätikön massaa. Lämpenevä ilmasto vaikuttaa jäätikön sisäiseen dynamiikkaan, jolla on taas vaikutus jäätiköstä mereen purkautuvan jään määrään. Lisäksi ilman lämpötilan nousu voi epäsuorasti lisätä jäätiköiden sulantaa lämmittämällä merivettä, jolloin lämpimämpi merivesi sulattaa jäätikössä kiinni olevia jäähyllisiä alapäin. Etelämantereella tärkeimmät jäätikön massaan vaikuttavat tekijät ovat lisääntyneen sadannan aiheuttama massalisäys ja jään purkautuminen mereen (Church et al., 2013). Grönlannissa jäätikön pinnantase, eli se onko jäätikön pintalämpötila sulamispisteen ylä- vai alapuolella, ja jäätiköltä lähtevä ulosvirtaama, hallitsevat jäätikön massatasetta (Church et al., 2013). Sulavat mannerjäätiköt aiheuttavat muutoksen maan painovoimakenttään. Sulaessaan jäätikön massa pienenee, jolloin myös jäätikön painovoimavaikutus pienenee. Tällöin jäätikön viereinen merenpinta laskee suhteessa lähtötasoon eli sulamattoman jäätikön tilanteeseen, ja vastaavasti kaukana oleva merenpinta nousee suhteessa lähtötasoon (Mitrovica et al., 2001; Tamisiea et al., 2003). Lisäksi valtamerten vesimäärän lisääntyminen painaa meren pohjaa alaspäin. Tällöin merenpinnan nousu ei ole yhtä suuri, kuin lisääntynyt vesimäärä jaettuna maapallon merien pinta-alalla olisi.

IPCC:n viimeisimmässä arviointiraportin osaraportissa on kerätty aineistoa Grönlannin ja Etelämantereen massataseiden vaikutuksesta merenpinnan nousuun. Raportin mukaan Grönlannin sulaminen on kiihtynyt viimeisten vuosikymmenten aikana. Vuosien 1992–2001 välinen vaikutus merenpinnan nousuun oli  $0,09 \pm 0,11$  mm/v<sup>1</sup> ja vuosina 2002–2011 Grönlannin massahävikki nostatti merenpintaa jo  $0,59 \pm 0,17$  mm/v. Myös Etelämantereen massahäviön uskotaan kiihtyneen vuosien 1992–2001 arvosta  $0,08 \pm 0,17$  mm/v vuosien 2002–2011 arvoon  $0,4 \pm 0,2$  mm/v. (Vaughan et al., 2013)

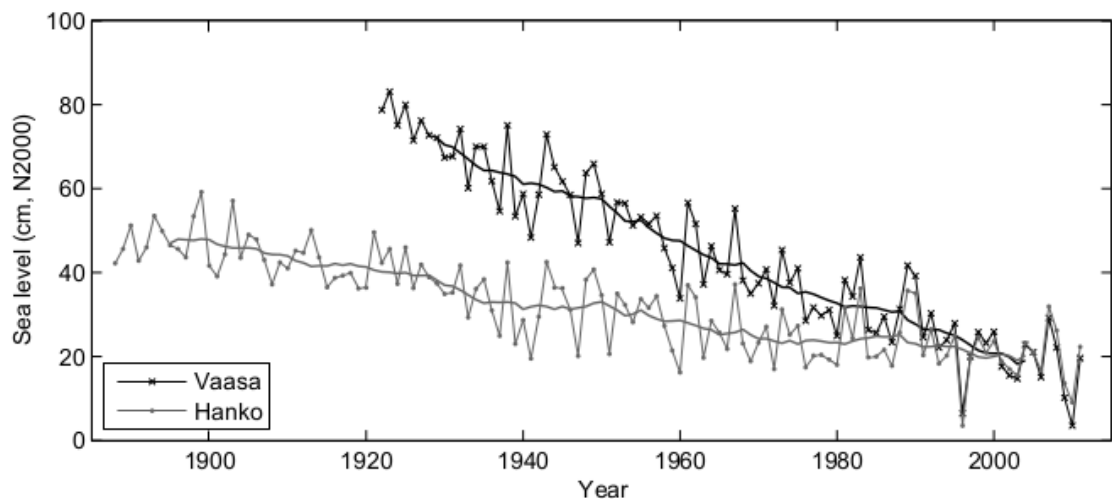
---

<sup>1</sup>Tässä tapauksessa virheraja ulottuu negatiiviselle puolelle eli Grönlannin jään määrä on voinut myös lisääntyä.

## 2.2 Merenpinnan muutokset Itämerellä

Merenpinnan nousun alueellinen vaihtelu on suurta ja paikallisesti merenpinnan korkeusmuutokset voivat erota globaalin merenpinnan nousun ennusteista huomattavasti. Paikallisia vaihteluita pitkässä aikaskaalassa aiheutuu merivirtojen ja suolaisuuden muutoksista, merten epätasaisesta lämpiämisestä, jäätiköiden sulamisen aiheuttamista painovoimakenttämuutoksista, meteorologisten tekijöiden paikallisista muutoksista sekä maankohoamisesta ja -vajoamisesta (Church et al., 2013). Viimeisimpien mallien mukaan paikalliset muutokset meriveden lämpötilassa, suolaisuudessa, merivirtojen muutoksissa sekä alueellisissa ilmanpainemuutoksissa nostavat Itämeren vaikutusalueen merenpinnan tasoa globaalia keskiarvoa enemmän, vaikutus on kuitenkin pieni (Pellikka et al., 2018; Church et al., 2013; Simpson et al., 2014; Slangen et al., 2014). Suurten mannerjäätiköiden sulaminen vaikuttavaa myös Itämeren merenpinnan tasoon. Lähijäätikön, Grönlannin, sulamisen aiheuttama painovoimavaikutus on Itämerellä pieni; mallitulosten (Mitrovica et al., 2001; Tamisiea et al., 2003) mukaan Itämeri sijaitsee Grönlannin painovoimavaikutuksen nollalinjalla. Tämä tarkoittaa Perämerelle merenpinnan laskua, ja muualle suomen rannikolla vähäistä merenpinnan nousua. Suurimmillaan Grönlannin vaikutus on 20% merenpinnan globaalin nousun keskiarvosta (Pellikka et al., 2018; Mitrovica et al., 2001; Tamisiea et al., 2003). Etelämantereen sulanta vaikuttaa Itämerellä merenpintaa nostavasti, vaikutus on noin 100–110% globaalin nousun keskiarvosta (Pellikka et al., 2018; Tamisiea et al., 2003). Grönlanti sulaa voimakkaammin kuin Etelämanter (Church et al., 2013). Mannerjäätiköiden yhteisvaikutus Itämeren merenpinnan korkeuteen on pienempi, kuin vaikutus globaaliin merenpinnan keskiarvoon.

Suomen rannikolla suurin merenpinnan suhteelliseen korkeuteen vaikuttava paikallinen tekijä on viimeisimmän jääkauden jälkeinen hidas maankohoaminen. Maanpinnan kohotessa merenpinnan keskimääräinen taso laskee maanpinnan tasoon verrattuna. Maankohoaminen onkin otettava huomioon kun mitataan keskimääräistä vedenkorkeutta Suomen rannikolla tai arvioidaan globaalin merenpinnan nousun vaikutusta. Jääkauden jälkeinen maankohoaminen on ollut hyvin tunnettua ja tasaista. Alueellinen maankohoaminen ja globaalin valtameren pinnannousu kumoavat toisiaan, mutta maankohoaminen on kuitenkin edelleen merenpinnan nousua suurempi tekijä koko Suomen rannikolla. Vuositasolla maankohoamisen ja merenpinnan nousun yhteisvaikutus on alle 1 cm kaikilla Suomen rannikon mareografipaikkakunnilla. Kuvassa 2.1 on esitetty Vaasan ja Hangan vuosikeskiarvoaikasarjat. Kuvassa Vaasan jyrkempi keskimääräinen lasku johtuu maankohoamisen suuremmasta arvosta. Kuvasta huomionarvoista on myös suuri vuosien välinen vaihtelu vedenkorkeuden vuosikeskiarvossa – vaihtelu on jopa 20 cm. Vaihtelu johtuu lyhytaikaisten meteorologisten tekijöiden vuosieroista. (Johansson et al., 2014)



Kuva 2.1: Vedenkorkeuden vuosikeskiarvo Vaasasta (1922–2011) ja Hangosta (1888–2011). Kuvaan on merkittu paksummilla viivoilla 15 vuoden liukuvat keskiarvot. Kuva: Johansson (2014)

## 2.3 Merenpinnan korkeuden mittaaminen

Perinteisesti globaalia merenpinnan muutosta on arvioitu pitkien mareografiaikasarjojen perusteella. Ensimmäiset itsestään mittaavat mareografit, joissa veden liikettä rekisteröitiin mittauskaivossa olevan uimurin kautta, otettiin käyttöön maailmanlaajuisesti 1830-luvulla. Mittalaitteet ja menetelmät ovat vuosikymmenten aikana kehittyneet, mutta rannikolta käsin tehtävät mareografimittaukset ovat edelleen korvaamaton merenpinnan korkeushavaintojen lähde. Vuodesta 1992 lähtien merenpinnan korkeutta on mitattu myös satelliiteista käsin. Ensimmäinen erityisesti merenpinnan korkeutta mittaava satelliitti oli vuonna 1992 laukaistu TOPEX/Poseidon. Tämän jälkeen merenpinnan korkeustiedoista on saatu katkeamaton aikasarja satelliittien Jason-1, Jason-2 ja viimeisimmän, vuonna 2016 laukaistun Jason-3 -satelliitin avulla.

Oli merenpinnan korkeuden mittausmenetelmä mikä hyvänsä, on tiedettävä mihin tasoon verrattuna mittaukset tehdään. Satelliitista käsin tehtävät mittaukset antavat merenpinnan korkeuden maan ellipsoiditasoon verrattuna, mutta mareografeilla merenpinnan korkeutta mitataan aina suhteessa maanpintaan nähden. Tällöin on oleellista tietää mareografien alueella pitkässä aikaskaalassa tapahtuvat maanpinnan muutokset. Tässä työssä käytetyt globaalin merenpinnan nousun mittausaikasarjat on esitetty luvussa 3.2.



# 3

## Merenpinnan noususkenaariot ja -mittausaikaasarjat

### 3.1 Merenpinnan noususkenaariot

Merenpinnan noususkenaario on arvio keskimääräisestä merenpinnan globaalista noususta tulevien vuosikymmenten aikana. Globaaliin merenpinnan nousuun vaikuttaa useita tekijöitä, joiden suuruuksia voidaan arvioida joko yksittäin tai kokonaisuutena.

Merenpinnan noususkenaarioita on tehty jo useamman kymmenen vuoden ajan, ja 1980-luvulla skenaarioita julkaistiin jo merkittävä määrä. Vuonna 1990 silloisella Merentutkimuslaitoksella laadittuun selvitykseen ”Meriveden korkeus, aallokko, lämpötila, suolaisuus ja biologinen kasvusto Loviisan rannikolla seuraavien 20–50 vuoden aikana” liittyi kirjallisuusselvitys 1980-luvulla julkaistuista globaalin keskimerenpinnan noususkenaariosta (Kahma et al., 1990). Kirjallisuusselvityksessä käytiin läpi laaja kirjo tutkimuksiin perustuvia artikkeleita ja muiden tekemiin tutkimusartikkeleihin viittaavia katsausartikkeleita. Selvityksessä huomiodut katsausartikkelit jätetään tämän työn ulkopuolelle. Taulukossa 3.1 on esitetty alkuperäiset tutkimusartikkelit, joihin tämä opinnäytetyö perustuu. Lisäksi työssä tarkastellaan IPCC:n ensimmäisessä arviointiraportissa esitettyjä skenaarioita vuodelta 1990 (Warrick ja Oerlemans, 1990). Tarkasteltujen skenaarioiden aloitusvuosi on joko 1980, 1985 tai 1990. Selvityksessä käsiteltyjen skenaarioiden arvioimis aika, eli kuinka pitkälle ajalle skenaariot on tehty, vaihtelee 50 vuodesta 200 vuoteen.

Merenpinnan noususkenaario voidaan muodostaa joko arvioimalla nousua kokonaisuutena tai osatekijöidensä summana. Kokonaisnousun arviointiin perustuvat skenaariot

riot ovat niin kutsuttuja semi-empiirisiä skenaarioita, jotka olettavat riippuvuussuhteen merenpinnan korkeuden ja jonkin ilmastollisen suureen välille. Ilmastollisena suurena voidaan käyttää esimerkiksi ilman lämpötilaa tai ilmakehän säteilypakotetta. Osa-tekijöiden erillisessä analyysissä arvioidaan merenpinnan nousuun vaikuttavien eri tekijöiden vaikutuksia. Suurimmat osatekijät ovat meriveden lämpölaajeneminen ja jäätiköiden massahäviö pääosin sulannan kautta. Näiden, sekä pienempien tekijöiden arvioimiseen on useita eri lähestymistapoja, mallintamisesta suuruusluokka-arvioon.

### 3.1.1 Lähdeartikkelit

Vastaava kirjoittaja	Julkaisuvuosi	Otsikko
Denness, B.	1987	Sea-Level modelling: The Past and the future
Hoffman, J.S.	1984	Estimates of future sea level rise
Hekstra, G.P.	1986	Will climate changes flood the Netherlands? Effects on agriculture, land use and well-being
Oerlemans, J.	1989	A projection of future sea level
Revelle, R.	1983	Probable future changes in sea level resulting from increased atmospheric carbon dioxide
Robin, G. deQ	1986	Changing the sea level
Thomas, R.H.	1987	Future sea-level rise and its early detection by satellite remote sensing
Warrick, R. ja Oerlemans, J.	1990	Sea Level Rise

Taulukko 3.1: Luettelo työssä käytetyistä lähdeartikkeleista. Tarkemmat viitteet löytyvät kirjallisuusluettelosta.

Tutkittavana on yhteensä kahdeksasta artikkelista kerätyt merenpinnan noususkenaariot ja lähdeartikkelit on listattu taulukossa 3.1. Lähdeartikkeleissa esitettiin yhteensä 21 merenpinnan noususkenaariota. Kaikki lähdeartikkelit on julkaistu 1980-luvulla, paitsi IPCC:n vuoden 1990 raportti (Warrick ja Oerlemans, 1990). Tämä perustuu aikaisemmin julkaistuihin tutkimuksiin, jolloin sen skenaarioiden voidaan katsoa kuuluvan samaan aikakauteen kuin muiden tässä työssä käsiteltyiden skenaarioiden. Tässä osiossa tarkastellaan jokaista lähdeartikkeliä erikseen ja kerrotaan mihin artikkelissa esitetyt merenpinnan noususkenaariot perustuvat. Joissain artikkelikuvauk-

sisä käytetään termiä ilmastoherkkyys, joka kuvaa ilmakehän tasapainolämpötilan nousua hiilidioksidipitoisuuden kaksinkertaistuessa ilmakehässä.

### Denness, 1987

Skenaario	Perustrendi	Ihmisen aiheuttama kiihtyvä nousu	Kokonaisnousu
Semi-empiirinen	–	–	62 cm
Osatekijöittäin arvoitu	9 cm	62 cm	71 cm

Taulukko 3.2: Artikkelissa Denness (1987) esitetyt merenpinnan noususkenaariot. Luvut kuvaavat merenpinnan nousua vuoteen 2050 mennessä.

Artikkelissa (Denness, 1987) pohditaan ihmisen aiheuttaman sekä ihmisestä riippumattoman lämpötilan nousun vaikutuksia ilmastoon historiallisesti sekä tulevaisuudessa. Siinä on esitetty kaksi merenpinnan noususkenaariota, joista toinen on semi-empiirinen ja toinen osatekijöittäin arvioitu taulukossa 3.2.

Artikkelin semi-empiirinen noususkenaario perustuu edellisen jääkauden päättymisen jälkeisen ilmakehän lämpötilan nousun ja merenpinnan nousun riippuvuuteen. Artikkelin mukaan edellisen jääkauden lopussa ilmakehän lämpötila nousi päiväntasaajan alueella noin 6 °C, ja globaali lämpötilan nousu oli noin 50 % enemmän eli 9 °C. Samassa ajanjaksossa merenpinta nousi 25 mm/v. Artikkelissa arvioidaan, että keskimäärin yhden asteen lämpötilan nousu aiheuttaisi merenpinnan nousua 2,7 mm/v. Esitetyssä noususkenaariossa ilmaston 3,5 °C lämpeneminen nostattaisi merenpintaa 9,5 mm/v ja aiheuttaisi 62 cm merenpinnan nousun vuoteen 2050 mennessä, ja merenpinnan nousu alkaisi samaan aikaan lämpötilan nousun kanssa.

Osatekijöittäin arvioidussa noususkenaariossa on erikseen käsitelty ihmisen aiheuttama merenpinnan nousu ja ihmisen toiminnasta riippumaton merenpinnan nousu. Artikkelin mukaan luonnollinen, ihmisestä riippumaton, ilmaston lämpeneminen vuoteen 2050 mennessä on 0,5 °C. Tämä johtaisi 9 senttimetrin merenpinnan nousuun vuoteen 2050 mennessä. Ihmisestä johtuvaa merenpinnan nousua arvioitiin kahden tekijän keskiarvona, nämä tekijät ovat vuosien 1920–1980 välinen merenpinnannousu ja lisääntyvän lämpösäteilyn aiheuttama jäätiköiden sulaminen. Artikkelin mukaan lyhyellä aikavälillä meriveden lämpölaajeneminen voitiin jättää huomiotta. Artikkelissa laskettiin jäätiköiden sulamisen aiheuttavan vuonna 2050 merenpinnan nousunopeudeksi 16,6 mm/v. Vuosien 1920–1980 välinen merenpinnannousu oli artikkelin mukaan noin 2,5 mm/vuodessa. Ihmisen aiheuttama keskimääräinen vedenkorkeuden nousun vuosien 1980–2050 välillä on näiden kahden arvion keskiarvo eli 9,5 mm/vuodessa ja

vuoteen 2050 mennessä yhteensä 62 cm. Ihmisestä johtuva ja ihmisestä riippumaton merenpinnannousu vuoteen 2050 mennessä olisi näin ollen yhteensä 71 cm.

Artikkelissa merenpinnannousun lähtötasona on vuosi 1985, eikä vuosien 1985–2050 välisille vuosille ole esitetty väliarvioita. Artikkelissa ei ole esitetty merenpinnan noususkenaarioita myöskään kuvallisesti.

### **SCOPE/Robin, 1986**

Artikkeli (Robin, 1986) on luku isommasta ilmastonmuutosta käsittelevästä julkaisusta, jossa pohditaan laajasti lämpölaajenemisen, mannerjäätiköiden (niin Etelämantereen, Grönlannin kuin pienempienkin jäätiköiden) sulavesien, Etelämantereen jääpurkauksen lisääntymisen sekä makean veden varannon pientymisen vaikutusta merenpinnan korkeuteen. Merenpinnan noususkenaarioiden laskemiseen käytetty kaava on

$$\Delta S_t = a\Delta K_{t-t_0} + b, \quad (3.1)$$

missä  $\Delta S$  ja  $\Delta K$  ovat 5 vuoden välein keskiarvotetut merenpinnan nousun muutos ja maapallon globaalin lämpötilan muutos ja  $t$  on aika. Kaava on johdettu alle 0.5 asteen historiallisesta ilman lämpötilan noususta ja samanaikaisesta merenpinnan noususta, joiden välille on tehty lineaarinen sovitus. Parametrit  $a$  ja  $b$  on siten saatu pienimmän neliösumman suoran sovituksella. Viive ( $t_0$ ) on laskettu minimoimalla hajonta merenpinnan nousun ja merenpinnan lämpötilamuutoksen välillä. Parametrille  $a$  annettiin artikkelissa arvot 16 cm/°C ja 30 cm/°C ja parametrille  $b$  käytettiin arvoa 0.3 cm. Ilmastoherkkyytenä on artikkelin mukaan käytetty arvoa  $3.5 \pm 2$  °C.

Kaava 3.1 on peräisin artikkelista Gornitz et al. (1982), jossa kaava on määritelty lasketun merenpinnan nousun ja artikkelin Hansen et al. (1981) ilman lämpötilan nousun perusteella. Hansen et al. (1981) paperissa määritelty ilman lämpenemiskäyrä kuvaa vuosien 1880–1980 välillä tapahtunutta alle 0.5 asteen ilman lämpötilan nousua.

Artikkelissa lähtötasona on käytetty vuotta 1980. Merenpinnan nousulle ei ole annettu väliarvioita vuosien 1980–2100 välille, eikä merenpinnan noususkenaarioita ole esitetty kuvallisesti. Artikkelissa esitettiin vuoden 2100 merenpinnan nousulle kolme arviota, nämä olivat 20 cm, 80 cm ja 165 cm. 80 senttimetrin nousua pidettiin todennäköisimpänä. Tässä työssä muodostettiin kolme skenaariota esitetyt kaavan 3.1 ja artikkelissa viitatus ilmanlämpötilan nousukäyrän Hansen et al. (1981) perusteella. Muodostettujen skenaarioiden ennusteet vuodelle 2100 vastaavat artikkelissa esitetyjä arvoja.

### **Revelle, 1983**

Revelle (1983) on antanut arviot merenpinnan luonnolliselle nousulle sekä kiihtyvälle



Merten lämpö- laajeneminen	Jäätiköiden sulannan perustrendi	Kiihtyvä muutos: Grönlanti ja pienet jäätiköt	Kokonaisnousu
30 cm	17 cm	24 cm (12 + 12)	71 cm

Taulukko 3.3: Artikkelissa Revelle (1983) esitettyjen merenpinnan noususkenaarioiden tekijät vuoteen 2080 mennessä.

ihmisestä johtuvalle merenpinnan nousulle että ihmisestä riippumattomalle perustrendille. Artikkelissa on esitetty yksi merenpinnan noususkenaario, jossa nämä arviot on yhdistetty.

Skenaarioissa ilman lämpötilan nousulle Grönlannin leveyspiirillä on käytetty arvoa 6 °C. Grönlannin sulamisen vaikutus merenpinnan tasoon olisi tällöin keskimäärin 12 cm/vuosisata, vuoristojäätiköiden ja muiden pienten jäätiköiden sulaminen vaikutus on arvioitu yhtä suureksi. Tätä 24 cm/vuosisata nousunopeutta pidetään artikkelissa ilman lämpötilan kiihtyvästä noususta johtuvana. Luontaisesta sulamisesta aiheutuva merenpinnan nousu vastaisi edellisen 50 vuoden aikana tapahtuneen jäätiköiden sulamisen vaikutusta, 17 cm/vuosisata. Yhteensä Grönlannin ja pienten jäätiköiden vaikutus merenpinnan nousuun vuoteen 2080 mennessä olisi siis 41 cm.

Artikkelin mukaan ilmakehän lämpötilan nousu vaikuttaa meren lämpölaajenemiseen diffuusiomallin mukaan noin 30 cm. Lämpölaajenemista mallinnettiin 1000 metrin syvyyteen ja napa-alueille oletettiin kaksinkertainen diffuusiokerroin. Diffuusiokertoimenä käytettiin arvoja 1,3 cm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> ja 2,6 cm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>. Suurin osa lämpölaajenemisesta tapahtuu sekoituskerroksessa, mutta myös syvän meren lämpölaajenemista on arvioitu.

Kokonaisarvio merenpinnan nousulle vuonna 2080 olisi tulokset yhdistämällä 71 cm. Niin jäätiköiden sulamisen kuin lämpölaajenemisenkin virherajoiksi artikkelissa on arvioitu vähintään ± 25 %, koska artikkelin mukaan silloista merenpinnan nousua, lämpötilan nousun vaikutus meren kiertoilikkeisiin ja lumen sadannan muutoksia ei tiedetä tarkasti. Suurimpana epävarmuustekijänä artikkelissa pidetään mahdollista Länsi-Etelämantereen jäähyllyn purkautumista. Artikkelissa esitetyt luvut on kerätty taulukkoon 3.3.

Artikkelissa lähtötasona on käytetty vuotta 1980. Vuosien 1980–2100 välille ei ole annettu väliarviota, eikä merenpinnan noususkenaarioita ole esitetty kuvallisesti.

## Hekstra, 1986

Hekstra (1986) keskittyy ilmastonmuutoksen aiheuttamaan merenpinnan nousuun Alankomaiden rannikolla. Merenpinnan nousua on arvioitu jakamalla ilmakehän lämmön nousun kahteen osaan: ihmisestä johtuvaan kiihtyvään osaan ja luontaiseen osaan

Skenaario	Ilmasto- skenaario	Perus- trendi	Merten lämpö- laajeneminen	Pienet jäätiköt	Grönlanti	Etelä- manner
Skenaario 1	2 °C	20 cm	8 cm	15 cm	4 cm	-5 cm
Skenaario 2	4 °C	20 cm	16 cm	25 cm	8 cm	0 cm

Taulukko 3.4: Artikkelissa Hekstra (1986) esitettyjen merenpinnan noususkenaarioiden tekijät vuoteen 2085 mennessä.

(perustrendiin). Artikkelissa on esitetty kaksi eri merenpinnan noususkenaariota. Skenaariot erottaa toisistaan käytetty globaali lämpötilan nousuarvio: joko 2 tai 4 °C. Polaarialueilla lämpötilan nousu olisi kummassakin tapauksessa kaksinkertainen. Arvio merenpinnan kokonaisnoususta vuodelle 2085 on 42 tai 69 cm, riippuen käytetystä ilman lämpötilan nousuarviosta. Luvuissa on mukana arvio meriveden lämpölaajenemista, Grönlannin ja pienten jäätiköiden sulannan vaikutuksesta sekä mahdollisesta merenpinnan laskusta Etelämantereella lisääntyneen sadannan ja sitä kautta jäätikön massan kasvun seurauksena. Artikkelissa oletetaan, että seuraavan 100 vuoden aikana puolet pienten jäätiköiden massasta sulaisi. Grönlannin sulannan oletetaan olevan aluksi hitaampaa, vuoteen 1985 mennessä vain 4–8 cm, mutta sitä seuraavalla vuosisadalla yhteensä 13–35 cm. Artikkelissa esitetyt arviot osatekijöiden suuruudesta on eritelty taulukkoon 3.4. Kaavoja, joilla lukuihin on päästy, ei ole artikkelissa annettu lainkaan. Alankomaiden rannikolle sopivaksi merenpinnan nousun perustrendiksi arvioitiin 20 cm/vuosisata. Tämän todetaan olevan 5 cm/vuosisata suurempi, kuin globaalin merenpinnan nousutrendi samalla aikavälillä.

Artikkelissa lähtötasona on käytetty vuotta 1985. Vuosien 1985–2085 välille ei ole esitetty väliarvioita, eikä merenpinnan noususkenaarioita ole esitetty kuvallisesti. Artikkelissa on sanallisesti kuvailtu merenpinnan nousu olevan kiihtyvää.

### Hoffman, 1984

Artikkelissa Hoffman (1984) esitetyt merenpinnan noususkenaariot perustuvat meriveden lämpölaajenemisen arviointiin. Artikkelissa jäätiköiden vaikutus merenpinnan nousuun on suoraan riippuvainen meriveden lämpölaajenemisen suuruudesta. Tutkimuksessa on esitetty 4 merenpinnan noususkenaariota: 2 keskiskenaariota ja 2 ääriskenaariota.

Artikkelissa oletetaan meren pintakerroksen lämpenevän yhtäaikaaisesti ilmakehän lämpötilan kanssa. Syvemmälle mentäessä meriveden lämpölaajenemisen oletetaan tapahtuvan viiveellä ilmakehän lämpenemiseen nähden, mutta viiveen kestoa ei ole kuitenkaan määritelty. Taulukossa 3.5 on eritelty eri skenaarioiden väliset eroavaisuu-

Skenaario	Ilmastoherkkyys	Merten lämpölaajeneminen, Diffuusiokerroin	Sulanta jäätiköiltä
Alaskenaario	1,5 °C	1,18 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	1 x lämpölaajenemisen vaikutus
Alakeskiskenaario	3 °C	1,54 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	1 x lämpölaajenemisen vaikutus
Yläkeskiskenaario	3 °C	1,54 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	2 x lämpölaajenemisen vaikutus
Yläskenaario	4,5 °C	1,9 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	2 x lämpölaajenemisen vaikutus

Taulukko 3.5: Artikkelissa Hoffman (1984) ilmoitetut eri skenaarioiden väliset tekijät meriveden lämpölaajenemisen kannalta. Ilmastoherkkyys kuvaa ilman lämpötilan nousua hiilidioksidimäärän kaksinkertaistuessa ilmakehässä.

Skenaario	2000	2025	2050	2075	2100
Alaskenaario	4,8 cm	13 cm	23,8 cm	38 cm	56,2 cm
Alakeskiskenaario	8,8 cm	26,2 cm	52,3 cm	91,2 cm	144,4 cm
Yläkeskiskenaario	13,2 cm	39,3 cm	78,6 cm	136,8 cm	216,6 cm
Yläskenaario	17,1 cm	54,9 cm	116,7 cm	212,7 cm	345 cm

Taulukko 3.6: Artikkelissa Hoffman (1984) esitetyt merenpinnan nousuennusteet vuosille 2000, 2025, 2050, 2075 ja 2100.

det ilmastoherkkydessä, meriveden lämpölaajentumisen laskennassa ja jäätiköiden sulannan arviossa. Kaksi keskimmäistä noususkenaariota eroavat toisistaan ainoastaan jäätiköiden sulannan vaikutuksen arvioinnissa. Meriveden lämpölaajenemisen ja jäätiköiden sulamisen välinen riippuvuussuhde määriteltiin historiallisen merenpinnan nousuarvion perusteella. Artikkelissa historialliselle merenpinnan nousulle käytetään arvoa 10–15 cm ja samalle ajalle meriveden lämpölaajenemisen arviota 5 cm. Nämä arvot perustuvat muihin julkaistuihin tutkimuksiin. Riippuvuussuhde lämpölaajenemisen ja jäätiköiden sulannan vaikutuksen välillä on näin ollen 1:1 tai 1:2.

Noususkenaarioiden lähtötasona on vuosi 1980. Artikkelissa esitettiin merenpinnan nousun kokonaismäärät vuoteen 2100 mennessä: alaskenaario 56,2 cm, alakeskiskenaario

144,4 cm, yläkeskiskenaario 216,6 cm ja yläskenaario 345 cm. Artikkelissa annettiin myös 25 vuoden välein arviot sen hetkisestä noususta ja nämä luvut on esitetty taulukossa 3.6.

## Oerlemans, 1989

Oerlemans (1989) arvioi meren lämpölaajenemisen, jäätiköiden jäämäärän muutosten ja pintasulannan sekä Länsi-Etelämantereen jäähyllyn hajoamisen vaikutuksia merenpinnan nousuun. Yksittäisten tekijöiden arvioita on kerätty muista julkaisuista. Artikkelissa myös arvioidaan muista lähteistä kerättyjen lukuarvojen uskottavuutta. Artikkelissa on esitetty yksi merenpinnan noususkenaario.

Artikkelissa arvioitiin Grönlannin massahäviön vaikuttavan merenpinnan nousuun noin 0,5 mm/v yhden asteen ilman lämpötilan nousua kohden. Lisäksi artikkelissa pohdittiin Etelämantereen vaikutusta. Etelämanner sijaitsee Grönlantia kylmemmässä ilmastossa, jolloin muutaman asteen lämpenevä ilmasto ei lisää Etelämantereen pintasulantaa. Lämpenevä ilmasto kuitenkin mahdollistaa suuremman sadannan ja näin pinnan massan lisääntymisen. Artikkelissa oletetaan Etelämantereen ilmaston lämpiävän 3 astetta ja jäämassan kasvun olevan 12% sadannan kasvun seurauksena sadan vuoden aikana. Etelämantereen jään lisääntymisen vaikutus meriveden korkeuteen olisi artikkelin mukaan -0,5 mm/v yhden asteen ilman lämpötilan nousua kohden. Näin Grönlannin massahäviö ja Etelämantereen massankasvun kumoavan toistensa vaikutukset. Artikkelin mukaan varsinkin jäätiköiden vaikutuksen arvioinnissa virherajat ovat suuret. Arvioiden epävarmuuden todetaan olevan lähes samaa luokkaa kuin arviot itsessään.

Artikkelissa todetaan merenpinnan nousun aiheutuvan seuraavan sadan vuoden aikana pääasiassa meriveden lämpölaajenemisesta ja pienten jäätiköiden sulamisesta, koska pienet manner- ja vuoristojäätiköt reagoivat ilmakehän lämpötilan muutoksiin polaarialueiden mannerjäätiköitä nopeammin. Näiden pienten jäätikköjen sulamistahti on verrannollinen ilman lämpötilan muutoksen lisäksi jäätikön tilavuuteen. Sekä lämpölaajenemisen että pienten jäätikköjen sulamisen uskotaan kasvavan ainakin vuoteen 2100 saakka. Artikkelissa ei ole annettu lukuarvoja manner- ja vuoristojäätiköiden sulamiselle tai meriveden lämpölaajentumiselle, mutta arviot on esitetty suurpiirteisesti artikkelikuvassa. Artikkelikuvasta arvioitiin karkeasti eri osatekijöiden suuruudet vuodelle 2030, ne on esitetty hieman alempana taulukossa 3.8. Artikkelin noususkenaariolähtötasovuosi on 1985, ja väliarvioita merenpinnan nousulle on annettu vuosille 2000 (6,2 cm), 2025 (20,5 cm), 2050 (33 cm), 2075 (50,5 cm) ja 2100 (65,6 cm). (Oerlemans, 1989)

## Thomas, 1987

Artikkelissa Thomas (1987) käydään läpi ja arvioidaan eri lähteistä kerättyjä merenpinnan nousuun vaikuttavia tekijöitä. Meriveden lämpölaajenemisesta, pintasulannasta jäätiköiltä ja jääpeitteisiltä alueilta, sekä jään purkautumisesta Etelämantereelta annettiin muiden tutkimuksiin perustuvat arviot merenpinnan nousulle. Artikkelissa määriteltiin todennäköisimmän nousun väli, joka on vuonna 2100 90–170 cm. Nousun taustalla on olettamus 3 °C ilmastoherkkyydestä, ja meriveden lämpölaajenemiselle on käytetty diffuusiokerrointa  $1,7 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ . Meriveden lämpölaajenemisen aiheuttaman merenpinnan nousunopeuden arvioidaan vuoden 2055 jälkeen pienentyvän, koska ajan kohdan jälkeistä pintakerroksen lämpenemistä tasapainottaa lämmön karkaaminen meren syvempiin kerroksiin.

Artikkelissa esitettiin myös kaksi ääriskenaariotapausta (alarajaskenaario ja ylärajaskenaario). Alarajaskenaariossa ilmakehän kolmen asteen lämpeneminen viivästyy 100 vuodella syvänmeren kerrokseen siirtyvän lämmön takia. Ylärajaskenaariossa oletetaan ilmastoherkkyydeksi 4,5 °C, jolloin sulamisen ja meriveden lämpölaajenemisen arviot ovat myös suurempia. Skenaarioiden osatekijät on kerätty taulukkoon 3.7.

Skenaario	Pienet jäätiköt	Grönlanti	Etelä-manner	Merten lämpö-laajeneminen	Kokonais-nousu
Yläraja-skenaario	35 cm	45 cm	80 cm	70 cm	230 cm
Keski-skenaariot	12–42 cm	13–34 cm	20–80 cm	30 cm (2055)	90–170 cm
Viivästynyt skenaario	$14 \pm 8 \text{ cm}$	$9 \pm 4 \text{ cm}$	13 cm	28 cm	60 cm

Taulukko 3.7: Artikkelin Thomas (1987) tekstissä esiteltyt yksittäisten merenpintaa nostavien tekijöiden vaikutusarviot vuoteen 2100 mennessä. Keskiskenaarioille merten lämpölaajenemisen arvio on annettu vain vuoteen 2055 asti.

Skenaarioiden lähtötasovuotena on 1980. Artikkelissa ei ole annettu väliarvoja numeroina, mutta sekä yksittäiset tekijät että kokonaisnousu on esitetty artikkelikuvissa vuosien 1980–2100 välille. Kokonaisnousun todennäköisimmäksi arvoksi on annettu 110 cm. Kokonaisnousukuvan ja artikkelitekstin perusteella on tässä tutkielmassa muodostettu 5 merenpinnan noususkenaariota. Artikkelissa esitetty kuva on kuitenkin pieni ja epätarkka, mikä tuo epävarmuutta kuvasta rekonstruoituihin skenaarioihin.

## IPCC/AR1, WG1; Warrick ja Oerlemans (1990)

IPCC AR1 (First Assessment Report) on vuonna 1988 perustetun hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin (Intergovernmental Panel on Climate Change) ensimmäinen ilmastonmuutoksen arviointiraportti. Raportin ilmastonmuutoksen tieteelliseen puoleen keskittyvä osaraportti ”Scientific Assessment of Climate Change” sisältää kappaleen ”Chapter 9: Sea Level Rise” (Warrick ja Oerlemans, 1990), jossa käsitellään ilmastonmuutoksen vaikutusta merenpinnan tasoon.

Globaalin merenpinnan noususkenaarioiden yksittäiset osatekijät (vuoteen 2030 mennessä) on esitetty taulukossa 3.8. Vuoden 2030 jälkeen osatekijöiden suuruuksia ei ole esitetty. Skenaariot perustuvat samassa raporttikokonaisuudessa annettuihin kasvihuonekaasupäästöskenaarioihin, joissa oletetaan, ettei kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi tehdä juurikaan toimenpiteitä. Päästöskenaariot on esitelty AR1 osaraportin kappaleessa ”The IPCC Response Strategies” (Shine et al., 1990). Merten lämpölaajenemisen arvio perustuu Wigley ja Raper (1987) kumpuamis-diffuusiomalliin, jolle on annettu lähtöarvoiksi skenaariosta riippuen ilmastoherkkyys  $1,5/2,5/4$  °C (ala/keski/ylä). Diffuusiokertoimena käytettiin kaikille skenaarioille arvoa  $0,63 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ . Kappaleessa käsiteltiin laaja-alaisesti pienten jäätiköiden, Grönlannin ja Etelämantereen tulevaisuudennäkymiä. Etelämantereen vaikutuksen uskotaan olevan — sadannan kasvaessa ja näin jäätikön massan lisääntyessä — merenpintaa laskeva.

Skenaario	Pienet jäätiköt	Grönlanti	Etelä-manner	Lämpölaajeneminen	2030	2075	2100
Yläskenaario	10,3 cm	3,7 cm	0 cm	14,9 cm	29 cm	71 cm	110 cm
Keski-skenaario	7,0 cm	1,8 cm	-0,6 cm	10,1 cm	18 cm	44 cm	66 cm
Alaskenaario	2,3 cm	0,5 cm	-0,8 cm	6,8 cm	8 cm	21 cm	31 cm
Oerlemans (1989)	≈12 cm	≈5 cm	≈-5 cm	≈12 cm			

Taulukko 3.8: Artikkelissa Warrick ja Oerlemans (1990) esitetyt yksittäisten merenpintaa nostavien tekijöiden vaikutusarviot vuodesta 1985 vuoteen 2030 mennessä sekä kokonaisnousut vuosille 2030, 2075 ja 2100. Taulukossa on lisäksi esitetty artikkelin Oerlemans (1989) kuvasta hyvin karkeasti arvioidut osatekijät vuodelle 2030. Etelämantereele on arviossa huomiotu sekä jäätikön massakavu että Länsi-Etelämantereen massahäviö.

## 3.2 Globaalin merenpinnan korkeuden mittausaikasarjat

Ensimmäinen pääasiassa merenpinnan korkeutta mittaava satelliitti, TOPEX/Poseidon, laukaistiin avaruuteen vuonna 1992. Tämän jälkeen merenpinnan korkeustiedoille on saatu satelliittien Jason-1, Jason-2 ja viimeisimmän, vuonna 2016 laukaistun Jason-3-satelliitin avulla katkeamaton aikasarja. Merenpinnan korkeuden satelliittimittaukset kattavat lähes koko maapallon, mutta ajallisesti aikasarja on vielä lyhyt verrattuna mareografiasemien merenpinnankorkeuden mittauksiin. Koska merenpinnan tasoa mitataan rannikolta käsin vertaamalla vedenkorkeutta maalla olevaan kiinteään pisteeseen, on mareografimittauksissa ongelmana maanpinnan muutosten huomioiminen. Lisäksi mareografiasemia on suhteellisen harvassa verrattuna satelliittimittausten kattavuuteen.

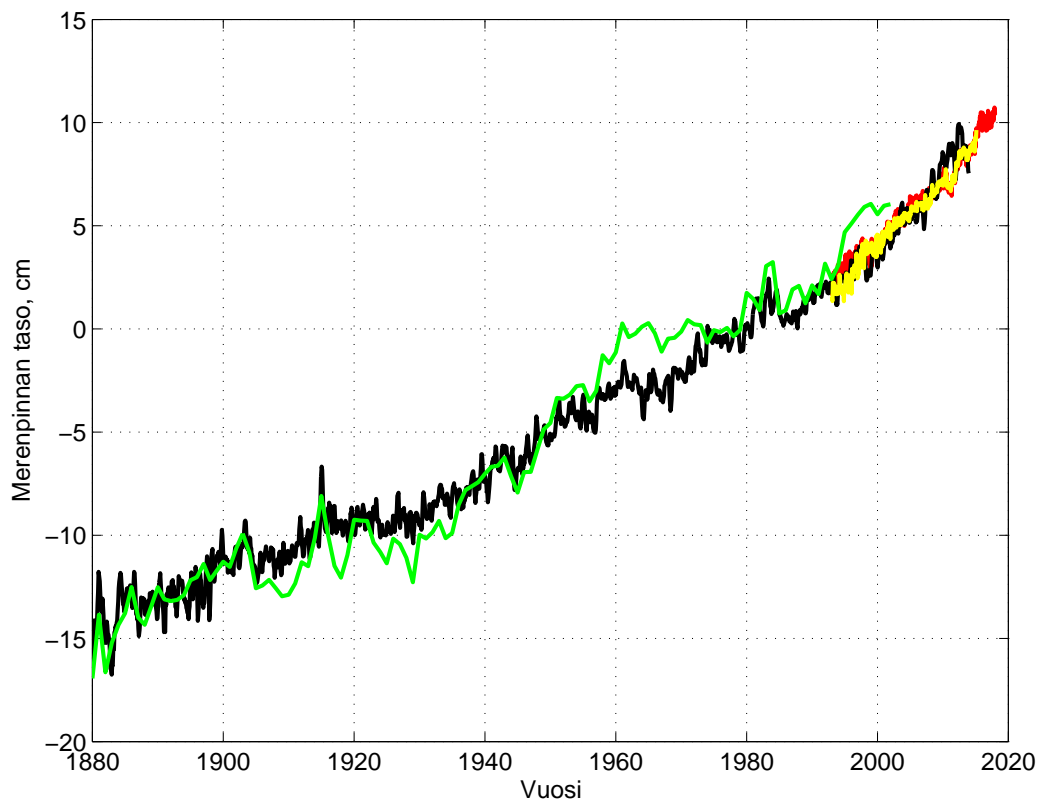
Globaali merenpinta on ollut nousussa koko viimeisen vuosisadan ja havaintojen mukaan nousu on kiihtymässä. Taustalla on lämpenevän ilmaston vaikutus meriveden lämpötilaan ja jäätiköiden sulamiseen. Tässä työssä on käytetty kolmesta eri lähteestä saatuja merenpinnan nousuaikasarjoja, jotka on esitetty kuvassa 3.1. Aikasarjoissa eroja on pituuden lisäksi myös käytetyssä mittausaineistossa. Kaksi aikasarjaa on rekonstruoitu mareografimittauksista ja kaksi perustuu satelliittihavaintoihin.

### 3.2.1 Aikasarja vuosille 1700–2002

Pisin tässä työssä käytetty merenpinnan nousuaikasarja alkaa jo vuodesta 1700, ja vuosi 1700 on myös aikasarjan nollataso (Jevrejeva et al., 2008). Aikasarja on rakennettu mareografimittauksien pohjalta. Jevrejeva et al. (2008) käytti niin kutsuttua virtuaaliasemamenetelmää, jossa globaali merenpinnan nousu selvitetään keskiarvoistamalla mittauksien tulokset ensin paikallisesti ja sitten eri merialueille. Ennen vuotta 1880 lasketun merenpinnan nousun virherajat ovat hyvin suuret käytössä olevien mareografien vähyden vuoksi. Tässä työssä tarkastellaan kuitenkin vain 1980 jälkeistä aikaa, jolloin mareografeja on ollut käytettävissä enemmän. Aikasarjan kokoamisessa on huomioitu paikalliset korkeusjärjestelmän muutokset ja jääkauden jälkeinen maankohoaminen. Vuosien 1993–2002 välille laskettu merenpinnan nousu on 3,4 mm/v. Tämä nousuaikasarja (myöhemmin J1) on merkitty kuvassa 3.1 vaaleanvihreällä. (Jevrejeva et al., 2008)

### 3.2.2 Aikasarja vuosille 1880–2013 ja vuosille 1993 – 2014

Church et al. julkaisi vuonna 2011 kaksi aikasarjaa merenpinnan nousulle vuoteen 2009 saakka. Ensimmäinen aikasarja on koottu vuosien 1993–2009 satelliittimittauksista ja toinen mareografien vedenkorkeusmittauksista vuosien 1880–2009 aikana. Julkaistuja



Kuva 3.1: Toteutuneet merenpinnannousun aikasarjat vuoden 1980 merenpinnan tasoon verrattuna. Vaaleanvihreä on julkaisusta Jevrejeva et al. (2008), musta ja keltainen ovat julkaisusta Church ja White (2011) ja punainen on julkaisusta Nerem et al. (2018). Aikasarjat on siirretty vuoden 1980 lähtötasolle kappaleessa 4.1 esitellyllä tavalla.

aikasarjoja on myöhemmin päivitetty: mareografimittauksiin perustuvaa aikasarjaa on jatkettu vuoteen 2013 saakka ja satelliittimittauksiin perustuvaa aikasarjaa vuoteen 2014 saakka. Kummankin aikasarjan nollataso on vuosi 1990. Aikavälille 1993–2009 satelliittihavainnoista laskettu merenpinnan nousu on  $3,2 \pm 0,4$  mm/v. Samalle ajankaksolle mareografihavainnoista laskettu merenpinnan nousu oli  $2,8 \pm 0,8$  mm/v. Satelliittimittauksiin perustuva nousuaikasarja (myöhemmin Cs) on kuvassa 3.1 merkitty keltaisella värillä ja mareografimittauksiin perustuva nousuaikasarja (myöhemmin Cm) on merkitty mustalla värillä. (Church ja White, 2011)

### 3.2.3 Aikasarja vuosille 1993–2018

Uusin tässä tutkielmassa käytetty merenpinnan nousuaikasarja on Nerem et al. julkaisu vuodelta 2018. Aikasarjan antaa merenpinnan nousun vuosille 1993–2018, ja nollatasona on vuosi 2005. Julkaisussa keskimääräinen merenpinnan nousu annettujen vuosien aikana on noin  $3,0 \pm 0,4$  mm/v ja merenpinnan nousun kiihtymiselle esitetään arvio  $0,084 \pm 0,025$  mm/v<sup>2</sup>. Aikasarja perustuu satelliittimittauksista saatuun merenpinnan



korkeusaineistoon, jota on kalibroitu globaalin mareografiverkoston mittausten avulla. Tämä nousuaikasarja (myöhemmin N1) on merkitty punaisella värillä kuvassa 3.1. Myöhemmissä kuvissa kaikki edellä mainitut 4 nousuaikasarjaa on esitetty mustalla värillä. (Nerem et al., 2018)



# 4

## Menetelmät

### 4.1 Merenpinnan nousun lähtötason valinta

Sekä toteutuneen merenpinnan nousun aikasarjoilla, että merenpinnan noususkenaarioilla aloitusvuosi vaihteli. Yhtenevä aloitusvuosi valittiin, jotta skenaariot ja aikasarjat olisivat keskenään verrattavissa. Tässä työssä aloitusvuodeksi valittiin vuosi 1980. Merenpinnan nousuaikasarjat sekä vuonna 1985 alkavat merenpinnan noususkenaariot siirrettiin tälle lähtötasolle.

#### **Toteutuneen merenpinnan nousun aikasarjat**

Taulukossa 4.1 on listattu toteutuneen merenpinnan nousun aikasarjojen aloitusvuodet artikkeleittain. Artikkelin Church ja White (2011) merenpinnan nousuaikasarjoilla (Cs ja Cm) aloitusvuotena on 1990 ja artikkelissa laskettiin vuosien 1993–2009 väliseksi merenpinnan nousunopeudeksi 2,8 mm/v. Nerem et al. (2018) nousuaikasarjan (N1) aloitusvuosi on 2005 ja artikkelissa laskettiin aikavälin 1993–2018 nousunopeudeksi  $3 \pm 0,4$  mm/v. Merenpinnan nousun kiihtyvyyden takia N1 aikasarjaa siirrettiin vastaamaan vuotta 1990 (vuodesta 2005) käyttäen artikkelin Church ja White (2011) merenpinnan nousuarvoa 2,8 mm/v, koska arvo kuvaa tarkemmin muutosta vuosien 1990–2005 välillä. Merenpinnan muutos vuoden 1980 ja lähtötasovuoden 1990 välillä selvitetiin sovittamalla regressiosuora artikkelin Church ja White (2011) mareografi- mitauksiin perustustuvaan aikasarjaan (Cm) vuosien 1970–2000 välille saaden näin nousunopeudeksi 1,7 mm/v. Saadulla tuloksella siirrettiin J1, Cs ja Cm aikasarjan nollakohdat vuodesta 1990 vuoteen 1980.

Artikkelissa Jevrejeva et al. (2008) ei ole määritelty 1700-luvulta alkavan aikasarjan

Artikkeli	Lähtötasovuosi
Church ja White (2011)	1990
Nerem et al. (2018)	1993
Jevrejeva et al. (2008)	ei tietoa

Taulukko 4.1: Toteutuneen merenpinnan nousun aikasarjojen lähtötasovuodet.

J1 nollassa. Mutta, sekä J1 että Cm kuvaavat merenpinnan nousua aikavälillä 1880–1980, jolloin on oletettavaa, että aikasarjojen keskiarvojen tulisi olla tällä aikavälillä sama. Näin J1 aikasarjan nollassa siirrettiin vuoteen 1980 laskemalla aikasarjaa alaspäin niin, että sen keskiarvo on sama kuin Cm aikasarjan lähtötasolla 1980. Kuvassa 3.1 on tässä työssä käytetyt merenpinnan nousuaikasarjat siirrettynä lähtötasolle 1980.

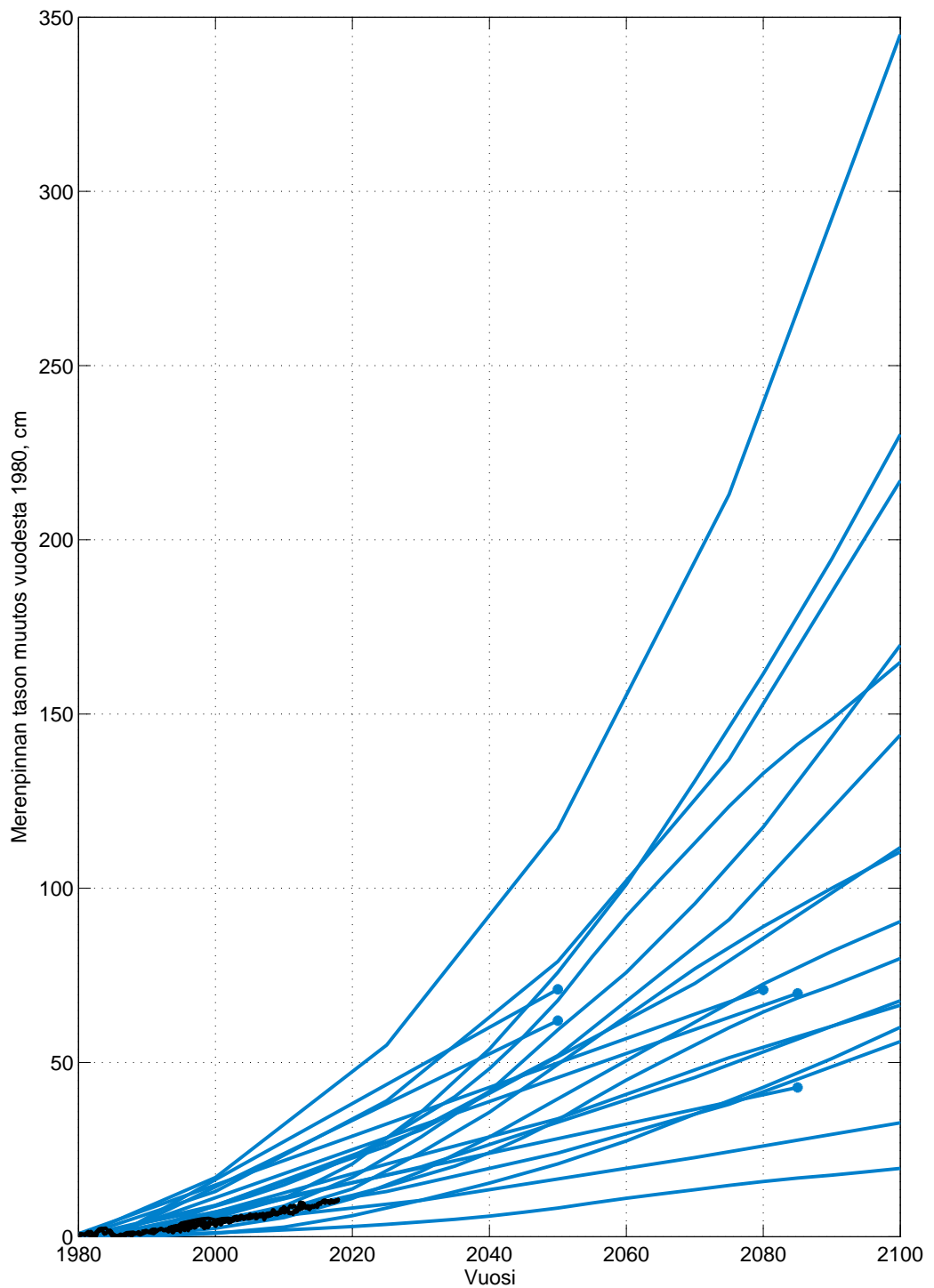
### Merenpinnan noususkenaariot

Merenpinnan noususkenaariot alkavat lähdeartikkelista riippuen joko vuodesta 1980, 1985 tai 1990. Vuodesta 1985 ja 1990 alkavat noususkenaariot siirrettiin vuoden 1980 tasolle käyttäen nousunopeutena samaa arvoa,  $1,7 \text{ mm/v}$ , kuin siirrettäessä toteutuneen merenpinnan nousun aikasarjoja vuodesta 1990 vuoteen 1980. Noususkenaarioiden aloitusvuodet on esitetty taulukossa 4.2.

## 4.2 Merenpinnan noususkenaarioiden käsittely

Vuoden 1990 kirjallisuusselvityksessä (Kahma et al., 1990) merenpinnan noususkenaariot esitettiin lähdeartikkeleissa esitettyjen väliarvojen kautta kulkevinä murtoviivoina, kuten kuvassa 4.1. 21 noususkenaariota lisäksi kuvassa on esitetty toteutuneet merenpinnan nousuaikasarjat vuodesta 1980 vuoteen 2018. Kuvan 4.1 esitystapa tuo esille eri lähdeartikkeleista kerättyjen skenaarioiden väliset erot väliarvioiden määrässä. Noususkenaariot, joille väliarviot on annettu, kaartuvat selkeästi ajan funktiona, kun taas väliarvottomat skenaariot ovat suorina. Taulukossa 4.2 on listattu lähdeartikkeleissa annettujen väliarvojen vuosiluvut sekä niiden määrittelytapa.

Globaalit ilman lämpötilan noususkenaariot ovat kiihtyviä, ja yleisesti myös merenpinnan noususkenaarioiden oletetaan olevan kiihtyviä. Kuvassa 4.1 käytetty (lineaarinen) esitystapa vääristää siten ensimmäisten vuosikymmenten aikana odotettavissa olevaa nousua, etenkin jos skenaariossa ei ole annettu lähtötason lisäksi kuin lopetus-piste. Missään lähdeartikkeleista ei ole kuitenkaan oletettu nousun tapahtuvan tasaista vauhtia skenaarioiden aloitusvuodesta 1980 alkaen.



Kuva 4.1: Toteutunut merenpinnan nousu (musta) sekä noususkenaariot vuosille 1980–2100 (siniset). Noususkenaarioiden esitystapa on sama kuin vuoden 1990 raportissa. Muiden kuin vuoteen 2100 päättyvien skenaarioiden lopetuspiste on esitetty ympyrällä.

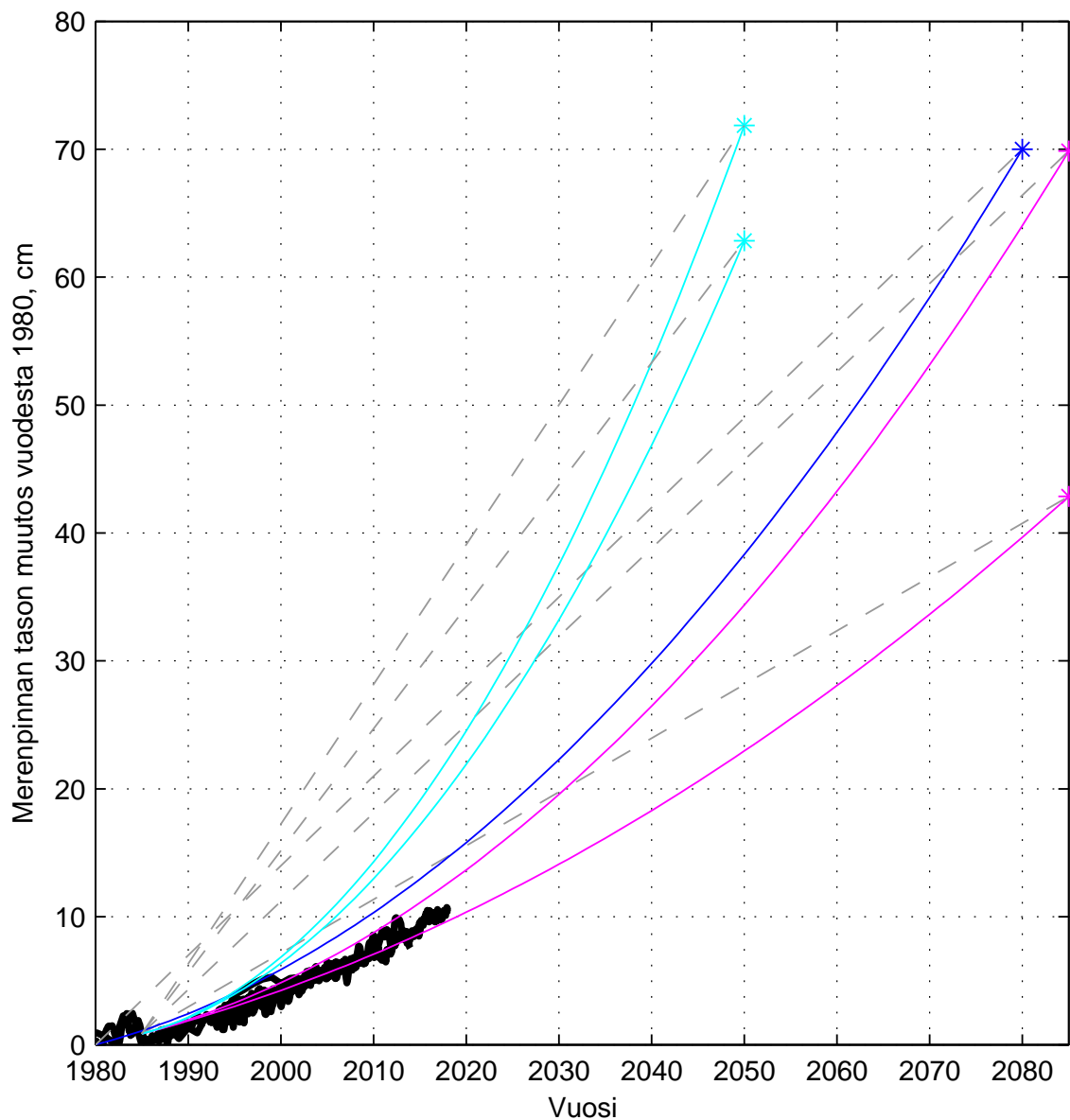
### Väliarvottomat skenaariot

Kolmessa lähdeartikkelissa (Denness, 1987; Hekstra, 1986; Revelle, 1983) esitetään ennuste merenpinnan korkeudesta ainoastaan skenaarion lopetusvuodelle. Artikkeleissa

Artikkeli	Skenaarion aloitusvuosi	Onko väliarvioita saatavissa	Vuodet, joille on nousuarvio	Väri kuvissa
Denness, 1987	1985	Ei	2050	Syaani
Hoffman, 1983	1980	Väliarvot annettu	2000, 2025, 2050, 2100	Oranssi
Hekstra, 1986	1985	Ei	2085, 2185	Magenta
Oerlemans, 1989	1985	Väliarvot annettu	2000, 2025, 2050, 2100	Keltainen
Revelle, 1983	1980	Ei	2080	Harmaa
Robin, 1986	1980	Noususkenaariot rekonstruoitu annetun kaavan sekä erillisen lämpötilakäyrän avulla	1980–2100	Ruskea
Thomas, 1987	1980	Väliarvot on määritetty kuvasta	1980–2100	Tumman vihreä
Warrick, 1990	1990	Väliarvot annettu	2030, 2070, 2100	Sininen

Taulukko 4.2: Lähdeartikkeleissa esitettyjen skenaarioiden aloitusvuodet, väliarvotiedot ja väri millä skenaariot on tulevissa kuvissa yleensä piirretty.

noususkenaariota ei ole myöskään esitetty kuvallisesti. Tämä tekee tulosten vertailun ongelmalliseksi. Artikkelin Denness (1987) skenaario pohjautuu oletukseen tasaisesti kiihtyvistä noususta, joten merenpinnan korkeutta ajan suhteen kuvaa toisen asteen polynomi. Myös muille Denness (1987); Hekstra (1986); Revelle (1983) skenaarioille oletettiin tasaisesti kiihtyvä nousu. Alkuperäinen lineaarinen esitystapa ja sovitetut (kiihtyvät) käyrät on esitetty kuvassa 4.2. Käytännössä käyrät muodostettiin ratkaisemalla toisen asteen yhtälö kyseisen noususkenaarion aloituspisteen, lopetuspisteen sekä Church ja White (2011) esittämän Cm aikasarjan vuosien 1960–1985 välille sovitetun regressiosuoran kulmakertoimen avulla. Kuvasta nähdään, että käyrät ovat lähempänä toteutunutta merenpinnan nousua kuin lineaariset suorat, jotka yliarvioivat merenpinnan nousua heti alkuvuosistaan lähtien.



Kuva 4.2: Murtoviiva –esitystavan (harmaa katkoviiva) ja sovitetun kaarevuuden (värikkiset) vertaus. (Hekstra, 1986): magenta, (Revelle, 1983): sininen, Denness (1987): syaani. Tähdet ovat lähdeartikkeleissa esitettyjen skenaarioiden loppupisteet. Toteutuneet merenpinnannousun käyrät on esitetty mustalla värillä.

### Väliarvolliset skenaariot

Lähdeartikkeleissa Hoffman (1984), Oerlemans (1989) ja Warrick ja Oerlemans (1990) on annettu vaihteleva määrä merenpinnan nousun väliarvioita. Kuvassa 4.1 esimerkiksi ylimmälle skenaariolle on annettu 4 väliarvoa. Tällaiset kulmat eivät ole merenpinnan nousun kannalta kuitenkaan luontaisia, paitsi erikseen perusteltuna. Tässä tapauksessa missään artikkelissa ei ole esitetty perusteluja kulmille, vaan ne johtuvat käytettävissä olevien välipisteiden vähyydestä. Käyrän sovitus esitettyihin skenaarioihin

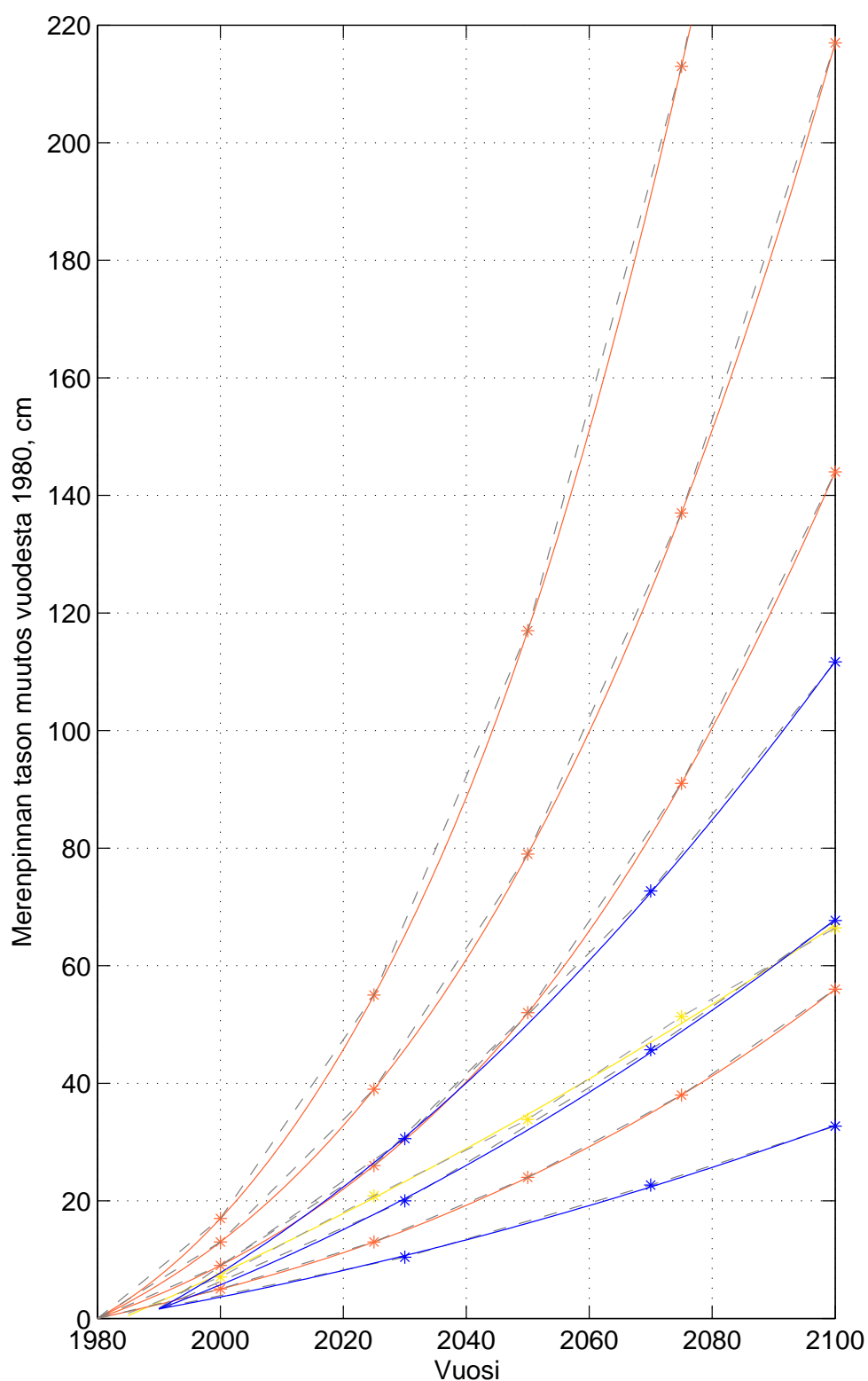
tasaa epäfysikaaliset kulmat. Kuvassa 4.3 lineaarista esitystapaa verrataan Matlabin spline-funktiolla tehtyihin sovituksiin. Spline-sovitusta päädyttiin käyttämään, koska sovituksella käyrät saadaan kulkemaan kaikkien väliarvojen kautta, toisin kuin toisen asteen yhtälön sovituksella. Myöhemmissä kuvissa käytetään sovitettuja käyriä, vaikka ero sovituksen ja alkuperäisen esitystavan välillä ei olekaan suuri.

### **Rekonstruoidut skenaariot**

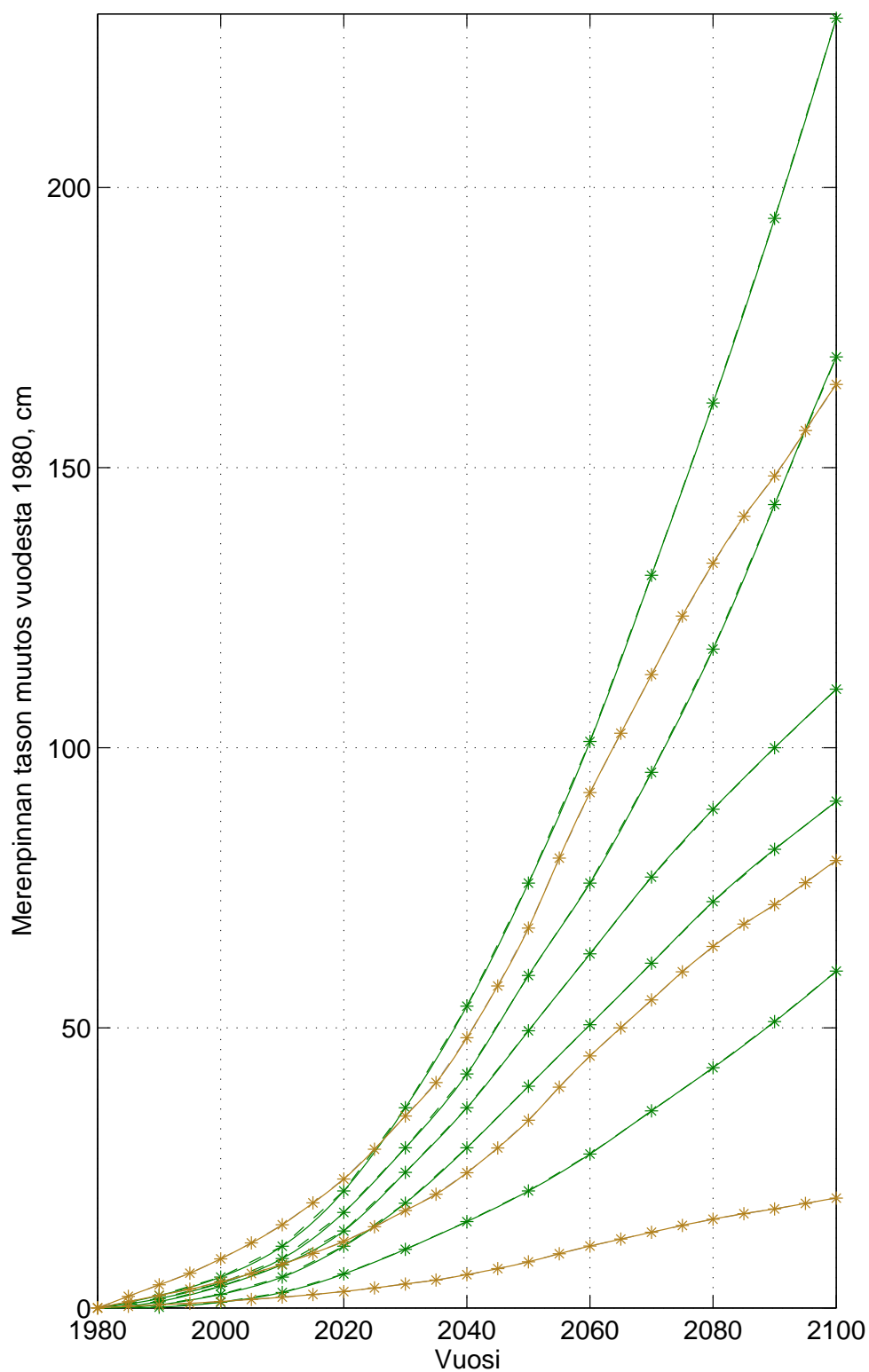
Kahdessa lähdeartikkelissa (Robin, 1986; Thomas, 1987) väliarvoja oli saatavissa graafisesti esitetystä merenpinnan nousukäyrästä (Thomas, 1987), tai rekonstruoitavissa julkaisussa esitetyn kaavan ja lähtöaineistona olevan graafisen lämpötilakäyrän avulla (Robin, 1986). Väliarvot merenpinnan nousukäyrille on päätetty tässä työssä tuottaa artikkelikuvien perusteella, mutta kuvien koon ja epätarkkuuden takia väliarvojen poimiminen ei ole ongelmatonta. Varsinkin artikkelissa Thomas (1987) oleva merenpinnan nousukäyräkuva on pieni ja epätarkka, alkuperäisessä kuvassa 4 mm nousu vastaa luonnossa 10 cm nousua. Artikkelissa esitetyt 5 skenaariota eroavat toisistaan ensimmäisen 20 vuoden aikana alkuperäisessä kuvassa vain noin 2 mm. Lisäksi skenaarioparven alatasen poikkeaminen nolasta venyy lähes 2000 luvulle, jonka jälkeen skenaariokäyrät nousevat kiihtyvällä tahdilla useamman kymmenen vuoden ajan. Pienet epätarkkuudet digitoinnissa voivat aiheuttaa suuren epätarkkuuden lopullisessa skenaariokäyrässä.

Kuvista rekonstruoidut skenaariokäyrät on esitetty kuvassa 4.4. Artikkelikuvista rekonstruoidut väliarvot on esitetty tähdillä. Kuvasta 4.4 ei juurikaan ole havaittavissa harmailla katkoviivoilla piirrettyjä lineaarisia sovituksia rekonstroituja pisteiden välillä, koska Matlabin spline-funktiolla sovitettut käyrät piirtyvät hyvin niiden päälle. Tämän työn lopuissa kuvissa rekonstruoidut skenaariot esitetään spline-sovitettuina käyrinä muiden skenaarioiden tapaan.





Kuva 4.3: Merenpinnan noususkenaariot lähdeartikkeleista Hoffman (1984): oranssi, Oerlemans (1989): keltainen ja Warrick ja Oerlemans (1990): sininen ajalle 1980–2100. Skenaarioiden välipisteet on esitetty tähdillä. Alkuperäinen esitystapa on harmaalla katkoviivalla.



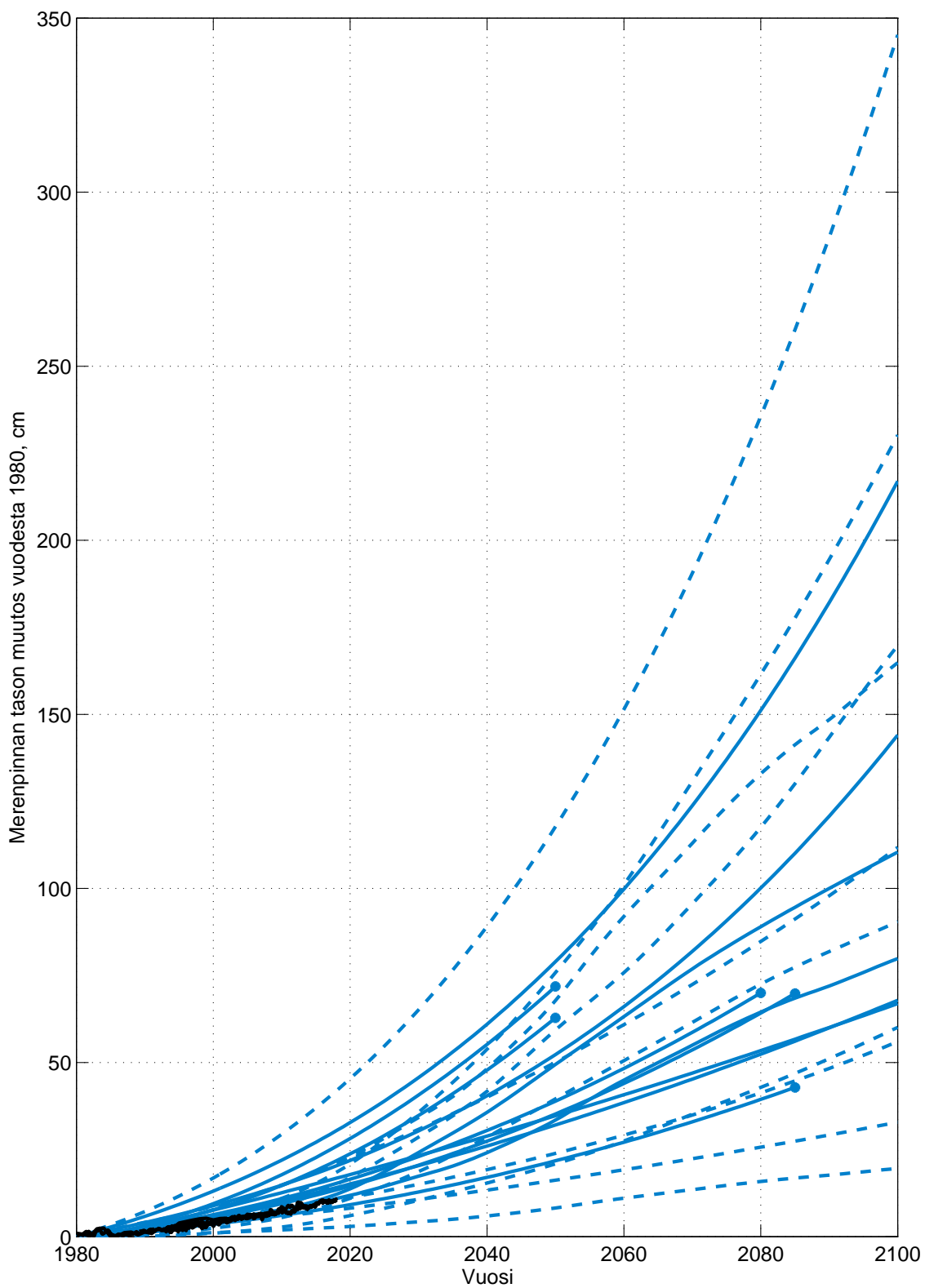
Kuva 4.4: Rekonstruoidut merenpinnan noususkenaariot. Alkuperäisen esitystavan mukaiset käyrät näkyvät taustalla harmailla katkoviivoilla ja spline-sovitukset seuraaville väreillä: Robin (1986) ruskea ja Thomas (1987) tummanvihreä. Skenaarioille rekontruoidut väliarvot on esitetty tähdillä.

# 5

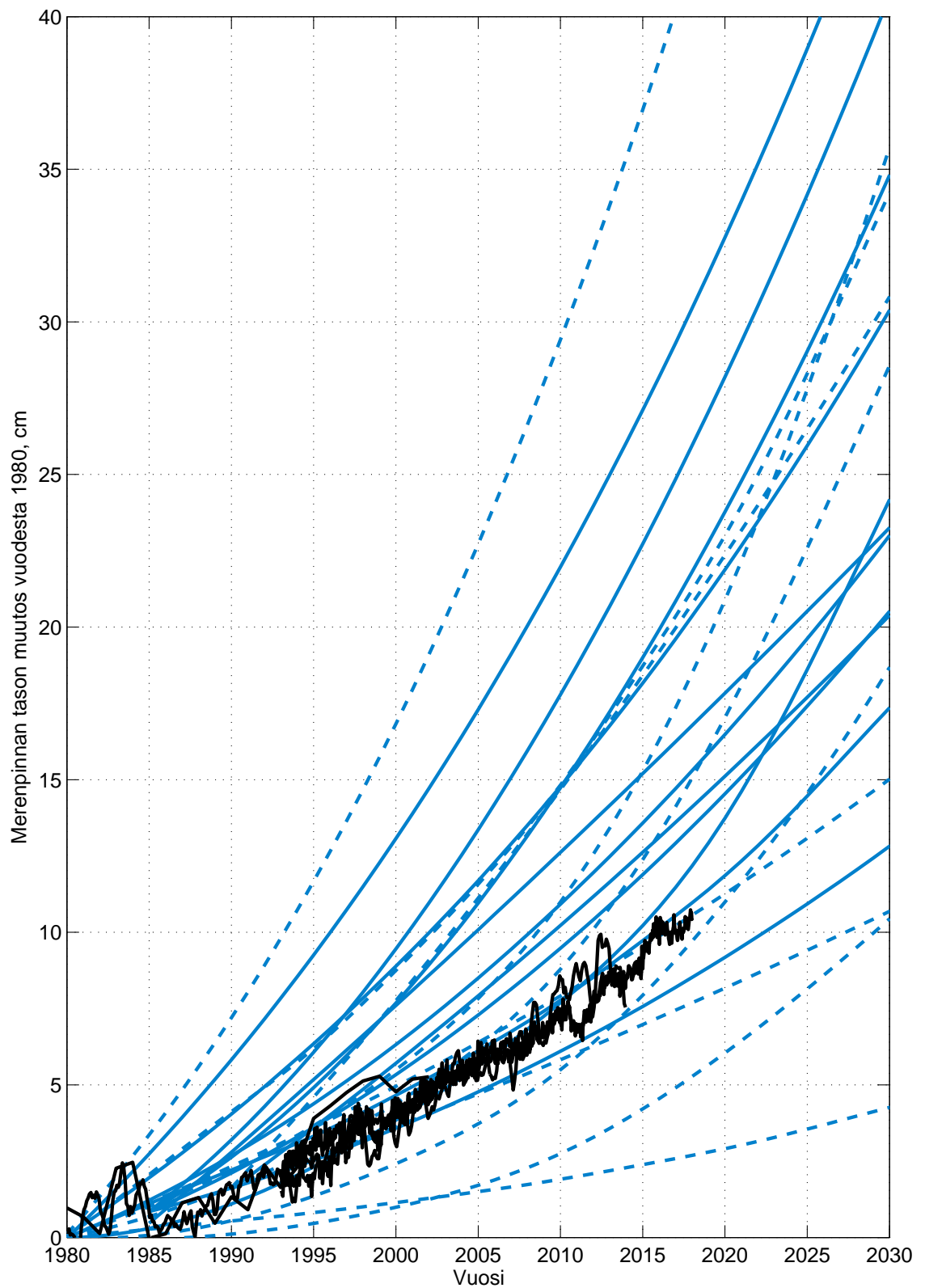
## Tulokset ja keskustelu

Kuvissa 5.1 ja 5.2 on esitetty kaikki edellä esitelty merenpinnan noususkenaariot edellisessä kappaleessa valituin sovelluksin, sekä toteutuneen merenpinnan nousun aikasarjat. Kuvat osoittavat skenaarioiden suuren vaihteluvälin: vuodesta 1980 vuoteen 2100 alin noususkenaario nousee 20 cm ja ylin noususkenaario 345 cm. Vaihteluväli on huomattavan suuri jo vuonna 2019, jolloin ylimmän ja alimman noususkenaarion välinen ero on 41 cm. Merenpinta on noussut vuodesta 1980 vuoteen 2018 noin 10 cm. Vuonna 2018 ylin noususkenaario oli jopa 31 cm toteutuneen merenpinnan nousun yläpuolella, myös kaikkien noususkenaarioiden keskiarvokin oli noin 6 cm toteutuneen merenpinnan nousun yläpuolella. Toteutunut vedenkorkeuden nousu on selvästi skenaarioiden mediaanin alapuolella: vajaa 70 % skenaarioista nousee nopeammin, kuin vedenkorkeus on todellisuudessa noussut.

Seuraavissa kappaleissa merenpinnan noususkenaariot jaotellaan erilaisiin ryhmiin ja tarkastellaan ryhmiteltyjen skenaarioiden osuvuutta todelliseen merenpinnan nousuun nähden. Ensin skenaariot jaetaan ääri- ja keskiskenaarioihin, jotka kuvaavat lähdeartikkelien kirjoittajien näkemystä skenaarion todennäköisyydestä. Keskiskenaariot kuvaavat kaikkein todennäköisimpinä pidettyjä noususkenaarioita. Lisäksi skenaariot jaetaan ryhmiin niiden tekotavan perusteella.



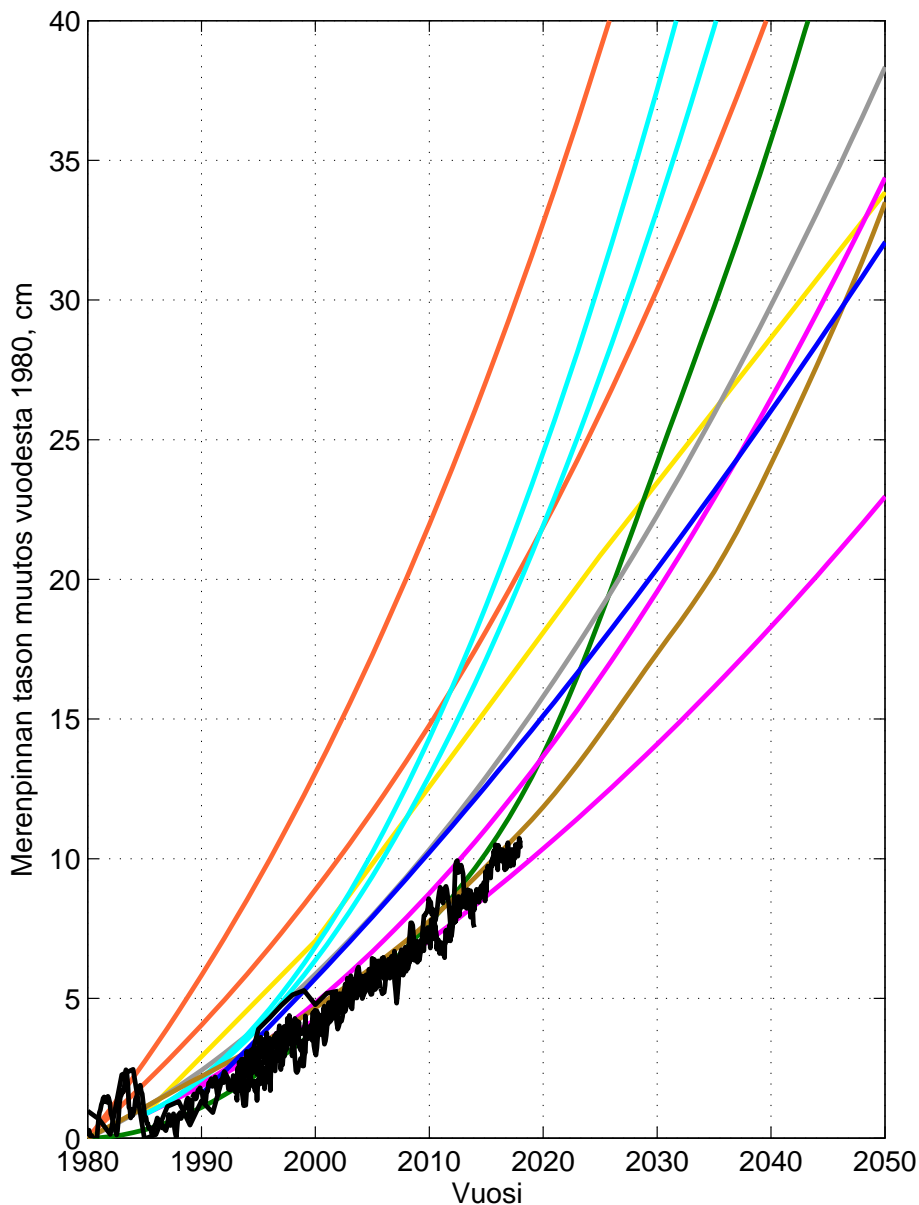
Kuva 5.1: Merenpinnan noususkenaariot vuoteen 2100 asti kappaleessa 4.2 valituilla sovituksilla, sekä toteutuneen merenpinnan nousun aikasarjat. Kappaleessa 5.1 esitetty ääriskenaariot on esitetty katkoviivoilla. Muiden kuin vuoteen 2100 päättyvien skenaarioiden lopetuspiste on esitetty ympyrällä.



Kuva 5.2: Osasuurennos kuvasta 5.1. Merenpinnan noususkenaariot vuoteen 2030 asti kappaleessa 4.2 valituilla sovituksilla, sekä toteutuneen merenpinnan nousun aikasarjat. Kappaleessa 5.1 esitetyt ääriskenaariot on esitetty katkoviivoilla.

## 5.1 Ääri- ja keskiskenaariot

Useimmissa tässä työssä käytetyissä lähdeartikkeleissa annettiin yksittäisen skenaarion sijaan skenaarioparvi, joissa ylimmät ja alimmat skenaario kuvaavat eri tavalla perusteltuja ääriennusteita. Seuraavassa kolmessa kuvassa, 5.3, 5.4 ja 5.5, on esitetty eri lähdeartikkeleissa ylä-, keski- tai alaskenaarioksi luettavat skenaariot. Myös kuvissa 5.1 ja 5.2 on käytetty samaa jaottelua: ylä- ja alaskenaariot on esitetty katkoviivoilla ja keskiskenaariot kiinteillä viivoilla.



Kuva 5.3: Merenpinnan nousun keskiskenaariot vuoteen 2025 asti. Denness (1987): syaani, Hekstra (1986): magenta, Revelle (1983): harmaa, Oerlemans (1989) : keltainen, Thomas (1987): tumman vihreä, Hoffman (1984): oranssi, Robin (1986): ruskea ja Warrick ja Oerlemans (1990): sininen

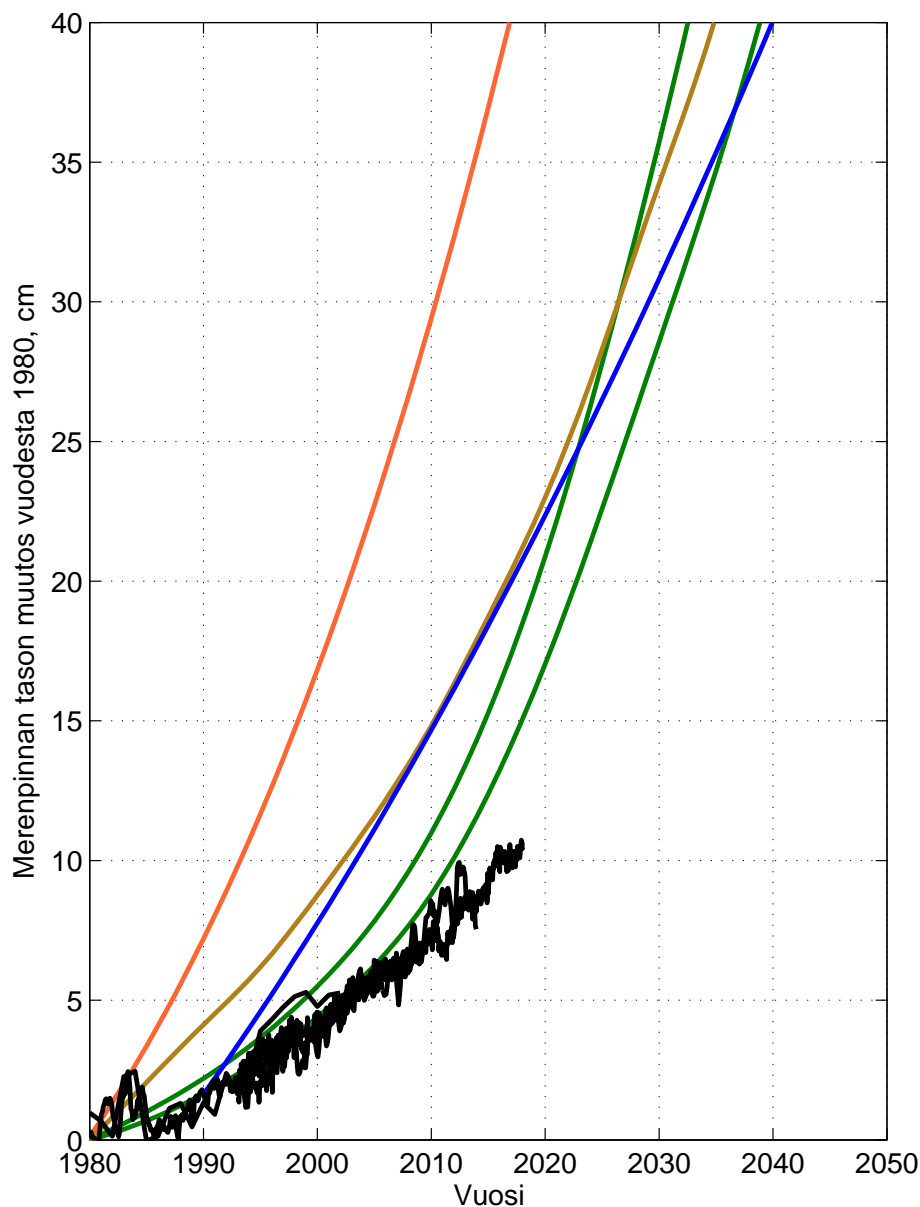
## Keskiskenaariot

Keskiskenaarioita ovat kaikki skenaariot, jotka on arvioitu lähdeartikkeleissa todennäköisimmäksi. Näiden lisäksi keskiskenaarioiksi on laskettu kaikki skenaariot niistä lähdeartikkeleista, joissa on annettu vain yksi tai kaksi skenaariota. Jos lähdeartikkelissa ei ole erikseen mainittu skenaarioiden tasoja, mutta samalla menetelmällä on tehty vähintään kolme skenaariota, on keskiskenaarioiksi laskettu keskimäinen skenaario. Keskiskenaariot on esitetty kuvassa 5.3. Kuvassa esitetään vähintään yksi skenaarion jokaisesta lähdeartikkelista. Kuvasta nähdään toteutuneen merenpinnan nousukäyrän kulkevan keskiskenaarioparven alaosassa: kaikki skenaariot olivat vuoteen 2015 toteutuneen merenpinnan nousun yläpuolella tai sen kanssa samalla tasolla. Vuonna 2018 skenaariot näyttivät suurimmillaan 20 cm yliarviota ja alin keskiskenaario (Hekstra, 1986) oli alle senttimetrin toteutuneen nousun alapuolella. Vuonna 2100 keskiskenaariot ennustavat 66–217 cm nousua, joskin alin keskiskenaario (Hekstra, 1986) loppuu jo vuonna 2085, ennustaen nousuksi 43 cm 1980 vuoden tasosta. Tämä nousuväli on edelleen hyvin laaja.

## Yläskenaariot

Yläskenaarioiksi luokitellaan skenaariot, joiden on erikseen mainittu kuvaavan merenpinnan nousun ylärajaa. Jos lähdeartikkelissa ei ole erikseen mainittu skenaarioiden tasoja, mutta samalla menetelmällä on tehty vähintään kolme skenaariota, on yläskenaarioiksi laskettu kaikki ylimmät skenaariot. Artikkelissa Thomas (1987) esitetään sekä todennäköisyysjakauman ylätasoskenaarion, että ääriarvona pidetty ylärajaskenaarion. Tässä työssä kumpikin on laskettu yläskenaarioksi. Yläskenaarioita on saatavilla artikkeleissa Thomas (1987), Hoffman (1984), Robin (1986) ja Warrick ja Oerlemans (1990) ja ne on esitetty kuvassa 5.4. Kuvasta nähdään, että kaikki viisi yläskenaariota ovat vuoteen 2018 mennessä toteutuneen nousun yläpuolella. Artikkelien Hoffman (1984), Robin (1986) ja Church et al. (2013) yläskenaariot kulkevat toteutuneen merenpinnan nousun yläpuolella selkeästi koko tarkastelujakson ajan ollen vuonna 2018 jo 10–31 cm toteutunutta merenpinnan nousua korkeammalla. Suurimmat skenaariot edellyttävät toteutuakseen lähitulevaisuudessa hyvin nopeaa vedenkorkeuden nousun kiihtymistä. Näin suurta kiihtymistä ei ole kuitenkaan esitetty missään tässä työssä käsitellyistä artikkeleista.

Artikkelin Thomas (1987) esittämät yläskenaariot – varsinkin todennäköisyysjakauman ylätasoa kuvaava skenaario – seuraavat toteutuneen merenpinnan nousua vuoteen 2000–2010 asti. Tämän jälkeen skenaariot nousevat toteutuneen merenpinnan nousun yläpuolelle, ja erot vuoteen 2018 mennessä ovat jo 4 ja 8 cm. Skenaarioiden nousunopeus kiihtyy nopeampaa tahtia kuin muiden skenaarioiden nousunopeus. Skenaarioiden (Thomas, 1987) välipisteet on rekonstruoitu pienestä artikkelikuvasta,



Kuva 5.4: Merenpinnan nousun yläskenaariot vuoteen 2025 asti. Thomas (1987): tumman vihreä, Hoffman (1984): oranssi, Robin (1986): ruskea ja Warrick ja Oerlemans (1990): sininen

jolloin pieni epätarkkuus kuvien tulkinnessa vaikuttaa kiihtyvyyden arvoon. Kuitenkin myös alkuperäisissä artikkelikuvissa on havaittavissa merenpinnan nousun kiihtymisen nopeutumista ja artikkelikuvien perusteella tämä näyttäisi johtuvan meriveden lämpölaajenemisesta. Artikkelin Thomas (1987) lämpölaajenemisen suuruus on laskettu yksinkertaisella diffuusiomallilla, jossa diffuusiokerrotimeksi on käytetty arvoa  $1,7 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ . Hoffman (1984) on käyttänyt samanlaista menetelmää ja siinä esitelty kolme korkeinta skenaariota on laskettu diffuusiokerroin-arvoilla  $1,54\text{--}1,9 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ . Näillä skenaarioilla ei ole kuitenkaan havaittavissa yhtä suurta kiihtymisen nopeutumista kuin

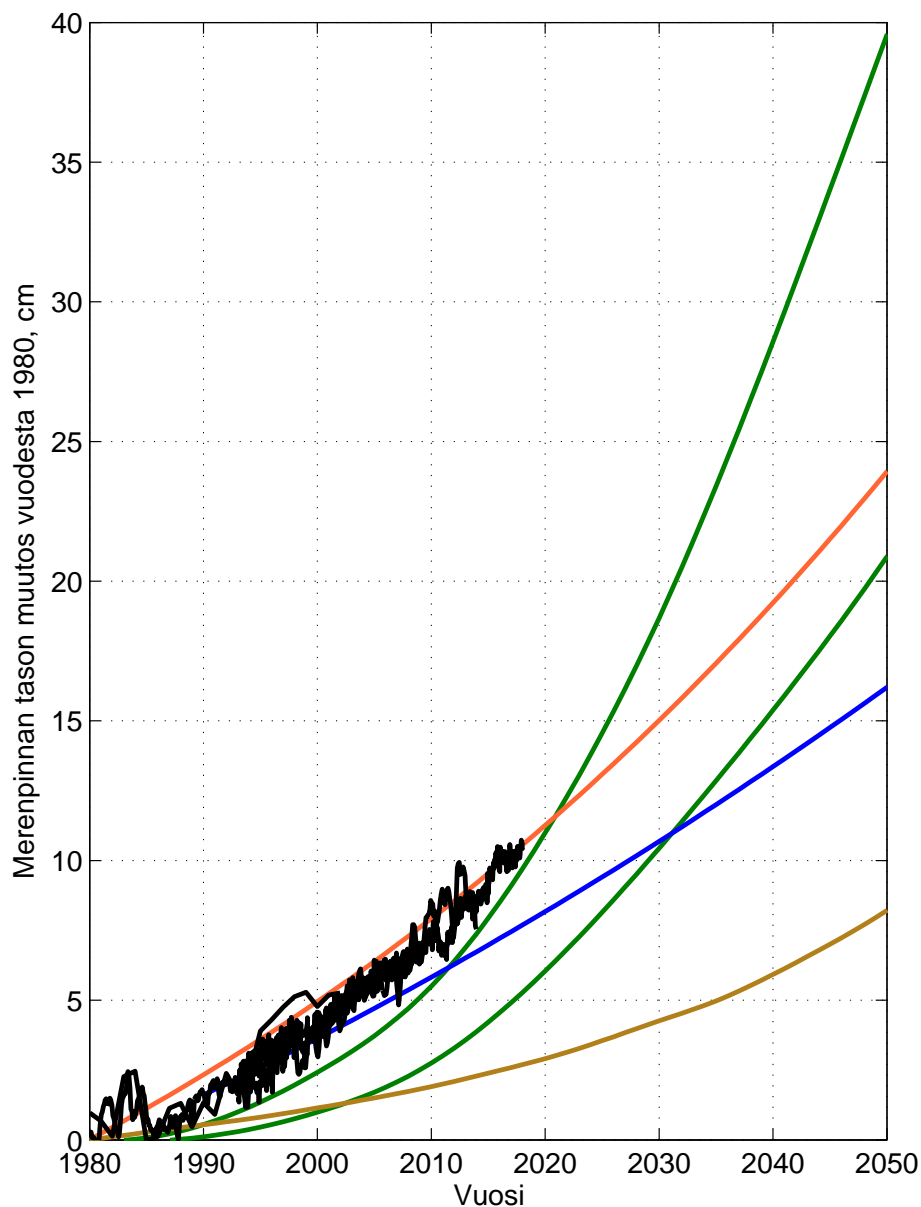


artikkelin Thomas (1987) skenaariolla, mutta merenpinnan nousunopeus on alusta alkaen todellista nousunopeutta huomattavasti suurempaa. Kuvista 5.4 ja 5.3 näiden skenaarioiden (Hoffman, 1984) nähdään olevan selkeästi korkeimmat skenaariot niin yläskenaario– kuin keskiskenaarioryhmässä. Ylin skenaario oli jo 1990 noin 5 cm toteutuneen merenpinnan nousun yläpuolella. Hoffman (1984) käyttää menetelmää, jossa jäätiköiden sulanta on suoraan riippuvainen lämpölaajenemisen suuruudesta. Menetelmä korostaa käytetyn diffuusiokertoimen arvoa, kun pieni epätarkkuus arvossa vaikuttaa merenpinnan nousuun sekä lämpölaajenemisen että jäätiköiden sulamisen arviossa.

Myös artikkelissa Revelle (1983) on käytetty suurta diffuusiokertoimen arvoa ( $1,3\text{--}2,6\text{ cm}^2\text{ s}^{-1}$  riippuen leveyspiiristä). Tämän skenaario yliarvioi merenpinnan nousun vuosien 1980–2018 välillä (piirretty harmaalla kuvassa 5.3), joskaan ei läheskään yhtä paljon kuin Hoffman (1984).

## **Alaskenaariot**

Kuvan 5.5 alaskenaariot ovat samoista lähdeartikkeleista kuin yläskenaariot (Thomas, 1987; Hoffman, 1984; Robin, 1986; Warrick ja Oerlemans, 1990). Alaskenaarioksi määritellään tässä tapauksessa artikkeleissa annettujen skenaarioparvien alimmat skenaariot. Kuten yläskenaarioidenkin kohdalla, myös alaskenaarioiden tapauksessa artikkelissa Thomas (1987) annettiin sekä todennäköisyysjakauman alatasoskenaario, että ääriarvona pidetty alarajaskenaario. Kuvasta nähdään, että yhtä lukuun ottamatta (Hoffman, 1984) kaikki skenaariot kulkevat tarkasteluvälillä toteutuneen merenpinnan nousun alapuolella. Tämä ero oli itseisarvoltaan vuonna 2018 0–8 cm. Alaskenaario on laskettu artikkelissa Hoffman (1984) käyttäen diffuusiokertoimen arvoa  $1,18\text{ cm}^2\text{ s}^{-1}$ .



Kuva 5.5: Merenpinnan nousun alaskenaariot vuoteen 2025 asti. Thomas (1987): tummanvihreä, Hoffman (1984): oranssi, Robin (1986): ruskea ja Warrick ja Oerlemans (1990): sininen

## 5.2 Skenaarioiden ryhmittely tyypin mukaan

Ylä-, keski- ja alaskenaariojaottelun lisäksi lähdeartikkeleissa esitetyt merenpinnan noususkenaariot voidaan jaotella skenaarioiden määrittelytavan perusteella semi-empiirisiin skenaarioihin ja tekijöittäin arvioituihin skenaarioihin. Merenpinnan noususkenaariot, jotka arvioivat merenpinnan nousua kokonaisuutena, ovat semi-empiirisiä. Näissä skenaarioissa merenpinnan nousun oletetaan olevan arvioitavissa menneestä merenpinnan noususta ja samanaikaisesta ilman lämpötilan muutoksesta. Merenpin-

nan nousuun vaikuttavia osatekijöitä voidaan arvioida myös yksitellen. Tärkeimmät merenpinnan nousuun vaikuttavat osatekijät ovat meriveden lämpölaajeneminen ja jäätiköiden massamuutokset.

### **5.2.1 Semi-empiiriset skenaariot**

Artikkeleissa Denness (1987) ja Robin (1986) annetaan semi-empiiriseen kaavaan perustuvat merenpinnan noususkenaariot. Skenaariot ovat samankaltaisia; kumpikin perustuu ilman lämpötilan- ja merenpinnan nousun riippuvuuteen sekä historiallisiin mittauksiin. Erona on käytetyn ilman lämpötilan muutoksen suuruus. Artikkelissa Robin (1986) käytetään kaavaa, joka on johdettu pienestä, lyhyessä aikaskaalassa tapahtuneesta ja suhteellisen hyvin tunnetusta ilman keskilämpötilan muutoksesta. Artikkelissa Denness (1987) tulos johdetaan suuresta ja pitkässä aikaskaalassa tapahtuneesta, mutta epävarmasta, ilman keskilämpötilan muutoksesta.

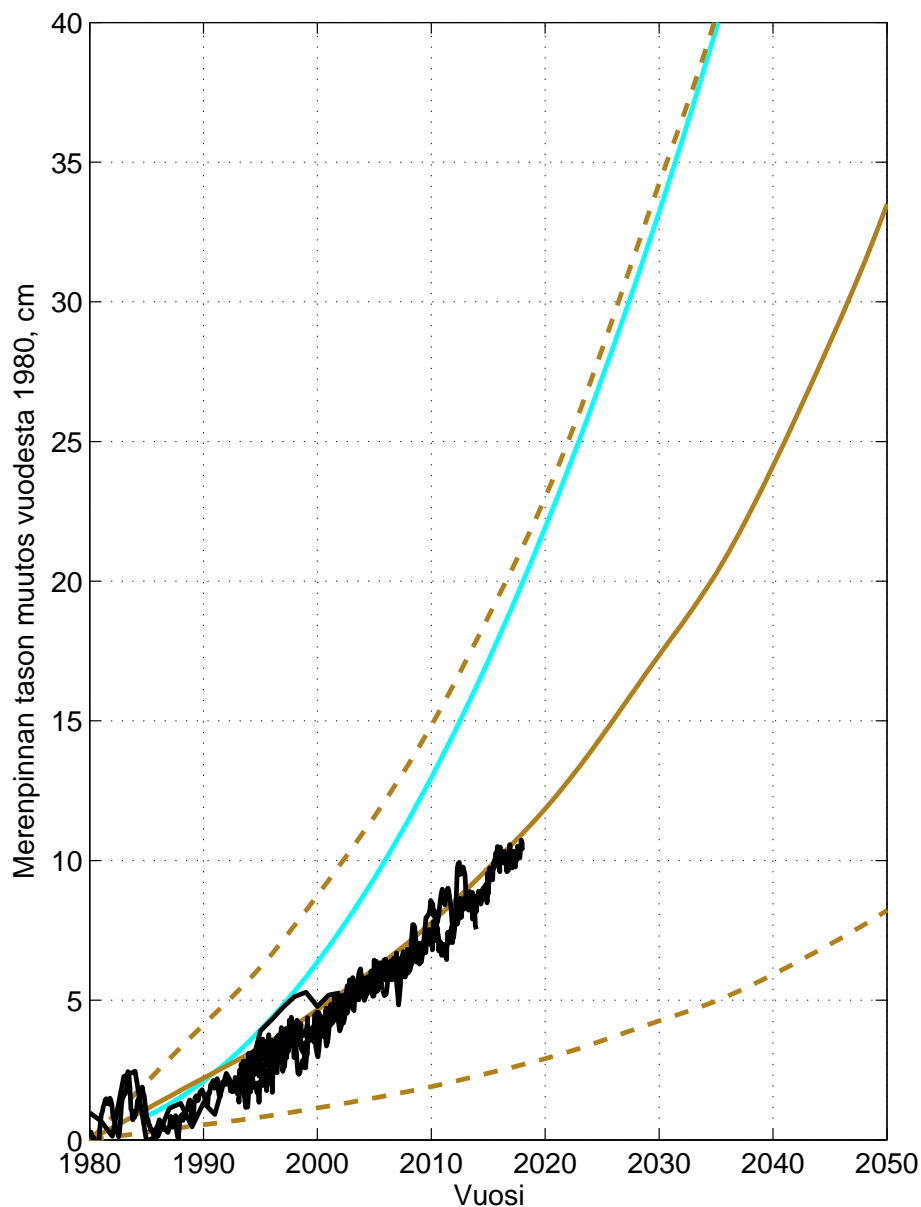
Semi-empiiriset skenaariot esitetään kuvassa 5.6, jossa ääriskenaariot on esitetty katkoviivoilla. Artikkelin Robin (1986) keskiskenaario seuraa merenpinnan nousua koko tarkastelujakson ajan tarkasti. Artikkelin Denness (1987) ainoa skenaario nousee merenpinnan nousuaikasarjojen yläpuolelle viimeistään vuonna 2000, ja vuonna 2018 skenaario on jo noin 9 cm merenpinnan nousun yläpuolella. Tämä skenaarion kuitenkin pysyy samalla tasolla artikkelin Robin (1986) yläskenaarion kanssa.

### **5.2.2 Tekijöittäin arvioidut skenaariot**

Useimmat tässä työssä arvioiduista lähdeartikkeleista sisältävät tekijöittäin arvioituja skenaarioita. Tekijöittäin arvioidut skenaariot on jaettu vielä kahteen alaryhmään tulosten tulkinnan helpottamiseksi. Ryhmä 1 sisältää lähdeartikkelit, joissa merenpinnan nousu on jaettu kahteen osaan: perustrendiin ja ihmisen aiheuttamasta ilmastomuutoksesta johtuvaan lisäykseen. Ryhmässä 2 ovat loput tässä työssä käsitellyissä lähdeartikkeleissa esitetyt skenaariot.

#### **Ryhmä 1: Perustrendi ja kiihtyvä nousu**

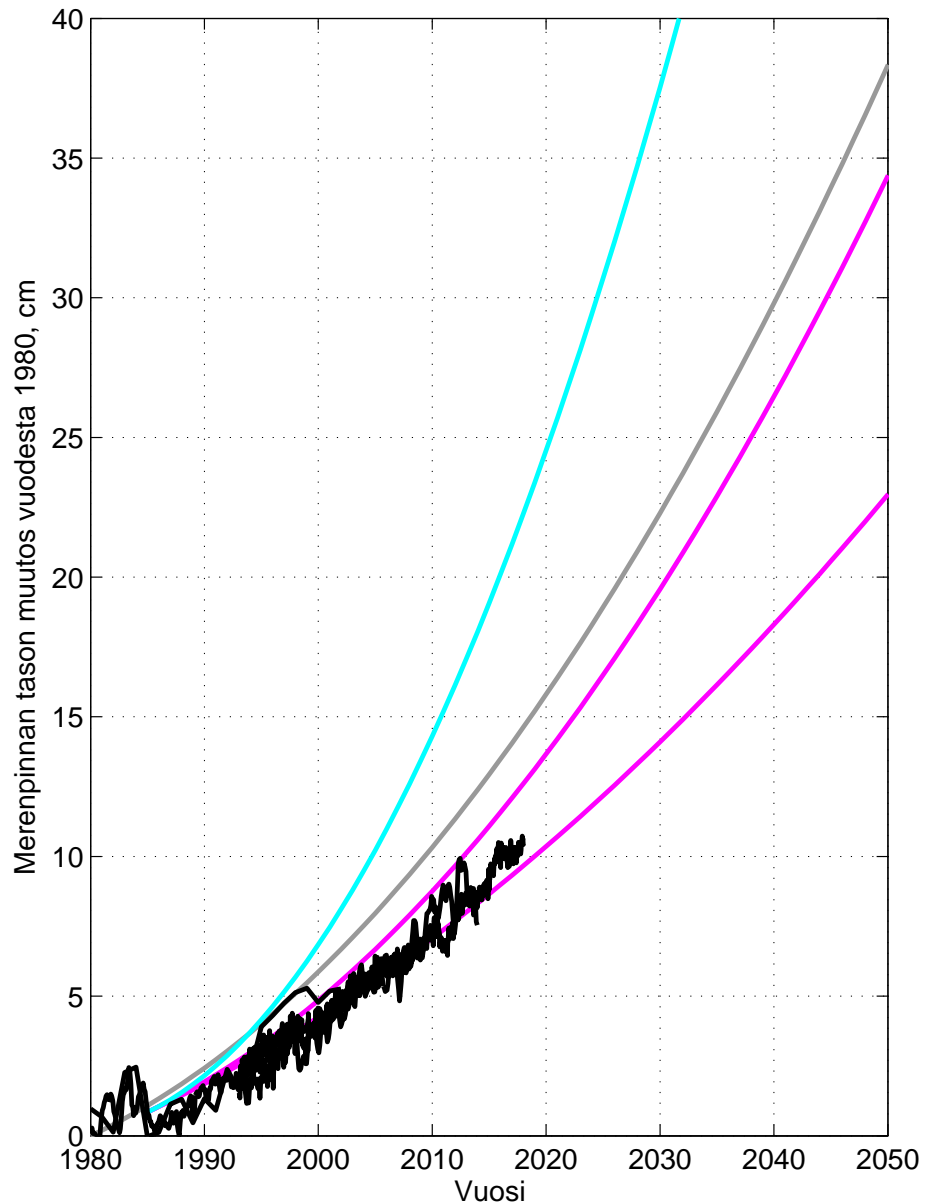
Kolmessa lähdeartikkelissa (Revelle, 1983; Hekstra, 1986; Denness, 1987) oletetaan tulevan merenpinnan nousun olevan ihmisen aiheuttaman merenpinnan nousun kiihtymisen ja merenpinnan luonnollisen nousun summa. Skenaariot on esitetty kuvassa 5.7. Kaikissa tämän ryhmän skenaarioissa on esitetty ennuste vain skenaarion lopetusvuoden merenpinnan nousulle. Skenaarioihin sovitettiin toisen asteen käyrä kappaleessa 4.2. Antamalla välipisteettömille noususkenaariolle kiihtyvyys, joka perustuu skenaarioiden alkuaajan toteutuneeseen merenpinnan nousuun, tulkitaan skenaariot nykytiedon mukaan mahdollisimman suotuisassa valossa. Kuvasta nähdään, että kiihtyvyydestä huolimatta skenaariot ovat joko toteutuneen merenpinnan nousun yläpuolella tai



Kuva 5.6: Semiempiiriset skenaariot ja toteutunut merenpinnan nousu vuoteen 2050 asti. Denness (1987): syaani ja Robin (1986): ruskea. Ääriarvoskenaariot on esitetty katkoviivoilla.

parhaimmillaan samalla tasolla. Artikkelin Hekstra (1986) skenaariot seuraavat toteutuneen merenpinnan nousua hyvin, ja vielä vuonna 2018 kumpikin skenaario on noin 2 cm päässä toteutuneen merenpinnan noususta. Muut kaksi skenaariota (Revelle, 1983; Denness, 1987) nousevat toteutuneen nousun yläpuolelle viimeistään vuoden 2000 jälkeen, niin että vuonna 2018 ero toteutuneeseen nousuun on 4 cm (Revelle, 1983) tai 22 cm (Denness, 1987). Toteutunut merenpinnan nousu oli vuonna 2018 noin 10 cm. Artikkelin (Denness, 1987) skenaario on noussut jo kaksi kertaa niin paljon. Skenaario (Denness, 1987) eroaa lähtökohdissaan selkeästi muiden ryhmän lähdeartikkelin

skenaarioista olettaessaan meriveden lämpölaajenemisen olevan lyhyellä aikavälillä merkityksetöntä, muiden lähdeartikkelien nostaessa lämpölaajeneminen yhdeksi tärkeimmistä tekijöistä. Lämpölaajenemisen huomiotta jättämisestä huolimatta skenaario nousee selkeästi muita tämän ryhmän skenaarioita nopeammin, jolloin on syytä olettaa skenaarion oletusten olevan virheellisiä.



Kuva 5.7: Tekijöittäin arvioidut skenaariot (ryhmä 1): skenaariot ja toteutunut merenpinnan nousu vuoteen 2050 asti. Denness (1987): syaani, Hekstra (1986): magenta, Revelle (1983): harmaa.

Taulukossa 5.1 on kerätty tässä ryhmässä käsiteltyjen skenaarioiden eri osatekijät. Taulukosta huomataan, että artikkelien arviot hieman eroavat toisistaan, mutta kaikissa ihmisen aiheuttama kiihtyvä merenpinnan nousu on suurempaa kuin luonnollinen

Skenaario	Globaali perustrendi	Ihmisen aiheuttama kiihtyvä nousu	Kokonaishousu
Denness, 1987	9 cm	62 cm	71 cm
Revelle, 1983	17 cm	24 + 30 cm	71 cm
Hekstra, 1986	20 cm	22–49 cm	42–69 cm

Taulukko 5.1: Lähdeartikkeleissa (Revelle, 1983; Hekstra, 1986; Denness, 1987) annetut merenpinnan noususkenaarioiden jaottelut perustrendiin ja kiihtyvään osaan.

perustrendi. Artikkelien Hekstra (1986) ja Revelle (1983) tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan, vaikkakin oletuksissa on pieniä eroja. Artikkelissa Hekstra (1986) arvioidaan pienten jäätiköiden sulannan olevan reilusti suurempaa kuin Grönlannin sulannan (4 tai 8 cm), mutta artikkelissa Revelle (1983) arvioidaan pienten jäätiköiden sulannan ja Grönlannin sulannan olevan samaa suuruusluokkaa (12 cm kumpikin).

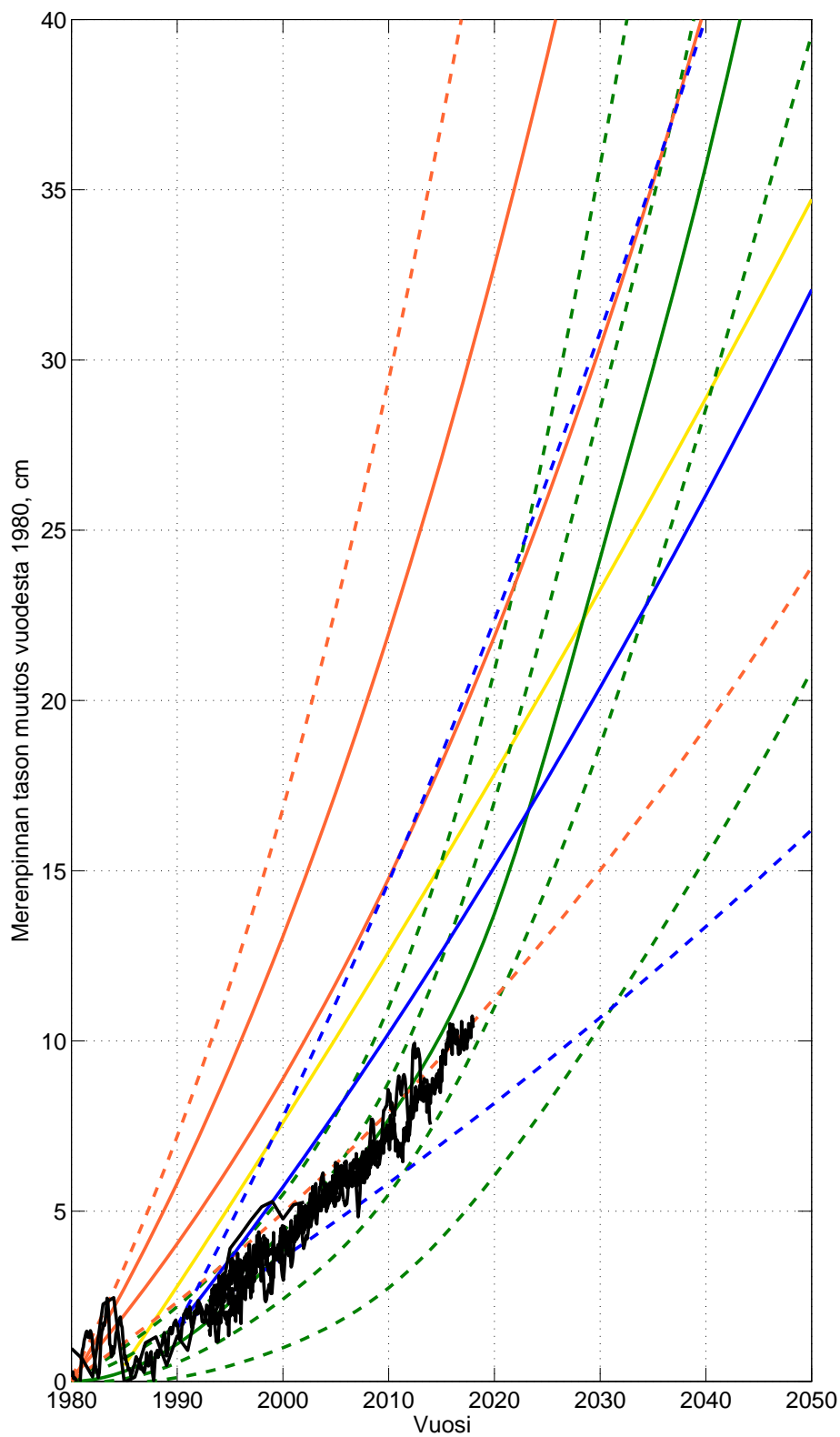
## Ryhmä 2: Muut

Tässä ryhmässä on neljästä lähdeartikkelista (Hoffman, 1984; Thomas, 1987; Oerlemans, 1989; Warrick ja Oerlemans, 1990) kerätyt skenaariot. Artikkelien ryhmittelyyn ei ole erityistä yhteistä tekijää, mutta artikkeleissa skenaarioiden muodostusmenetelmälle yhteistä on se, että eri osatekijöihin on kerätty arviota muista lähteistä. Ryhmän skenaariot on esitetty kuvassa 5.8. Lähdeartikkeleista Hoffman (1984) erotuu menetelmällisesti selkeästi muista, olettaessaan jäätikön sulamisen ja meriveden lämpölaajenemisen välille riippuvuussuhteen. Kuvasta nähdään, että tämän artikkelin ylimmät 3 skenaariota yliarvioivat merenpinnan nousua jo vuodesta 1985 lähtien – vuonna 2018 eroa toteutuneeseen on jo yli 10 cm. Kappaleessa 5.1 todettiin artikkelissa Hoffman (1984) käyttävän suuria diffuusikertoimen arvoja kolmessa ylimässä skenaariossaan ja menetelmän vielä korostavan käytettyä diffuusiokerrointa. Alaske-naario kuitenkin seuraa toteutuneen merenpinnan nousua hyvin, se perustuu muita pienempään diffusiokertoimen arvoon.

Kahden artikkelin (Thomas, 1987; Oerlemans, 1989) skenaarioiden suurin ero on Etelämantereen vaikutuksen arvioinnissa. Artikkelissa Thomas (1987) Etelämantereen arvioidaan nostavan globaalia merenpintaa parikymmentä senttiä vuoteen 2100 mennessä, myös Grönlannin ja pienten jäätiköiden vaikutus on samansuuruinen. Artikkelissa Oerlemans (1989) arviotiin Etelämantereen massakasvun kumoavan Grönlannin ja Länsi-Etelämantereen nousuvaikutuksen ainakin vuoteen 2100 asti. Pienten jäätiköiden vaikutus merenpinnan nousuun arvoitiin suunnilleen saman suuruiseksi kuin artikkelis-

sa Thomas (1987). IPCC:n 1990 raportissa (Warrick ja Oerlemans, 1990) annettiin arviot eri osatekijöille vuodelle 2030. Arvioita verrattiin artikkelin Oerlemans (1989) kuvasta arvioituihin arvoihin taulukossa 3.8. Taulukosta nähdään, että artikkelissa Oerlemans (1989) lämpölaajeneminen, pienten jäätiköiden sulanta, Grönlannin sulannan vaikutus ja Etelämantereen massakasvun vaikutus arviotiin hieman suuremmaksi, kuin raportin Warrick ja Oerlemans (1990) vastaavat keski- tai yläskenaarion arvot. Artikkelin Oerlemans (1989) skenaario nousee toteutuneen aikasarjan yläpuolelle selkeästi, ja vuonna 2018 ero on noin 7 cm. Myös raportin Warrick ja Oerlemans (1990) ylin skenaario nousee hieman toteutuneen aikasarjan yläpuolelle jo 1990-luvun aikana. Toteutunut merenpinnan nousu kulkee sen ala- ja keskiskenaarion välissä.

Artikkelin Thomas (1987) keskiskenaariot vaikuttaisivat osuvan toteutuneeseen merenpinnan nousuun hyvin tarkastelujaksolla 1980 – 2018. Mutta, kappaleessa 5.1 todettiin Thomas (1987) yläskenaarion kiihtyvän muita skenaariota nopeammin, myös muut Thomas (1987) kiihtyvät nopeasti. Vaikka tarkastelujaksolla toteutunut merenpinnan nousu pysyy Thomas (1987) kolmen keskimmäisen skenaarion rajaaman alueen sisällä, yksittäisiin skenaariohin verratessa ei toteutuneessa merenpinnan nousussa ole havaittavissa yhtä suurta nousunopeuden kasvamista.



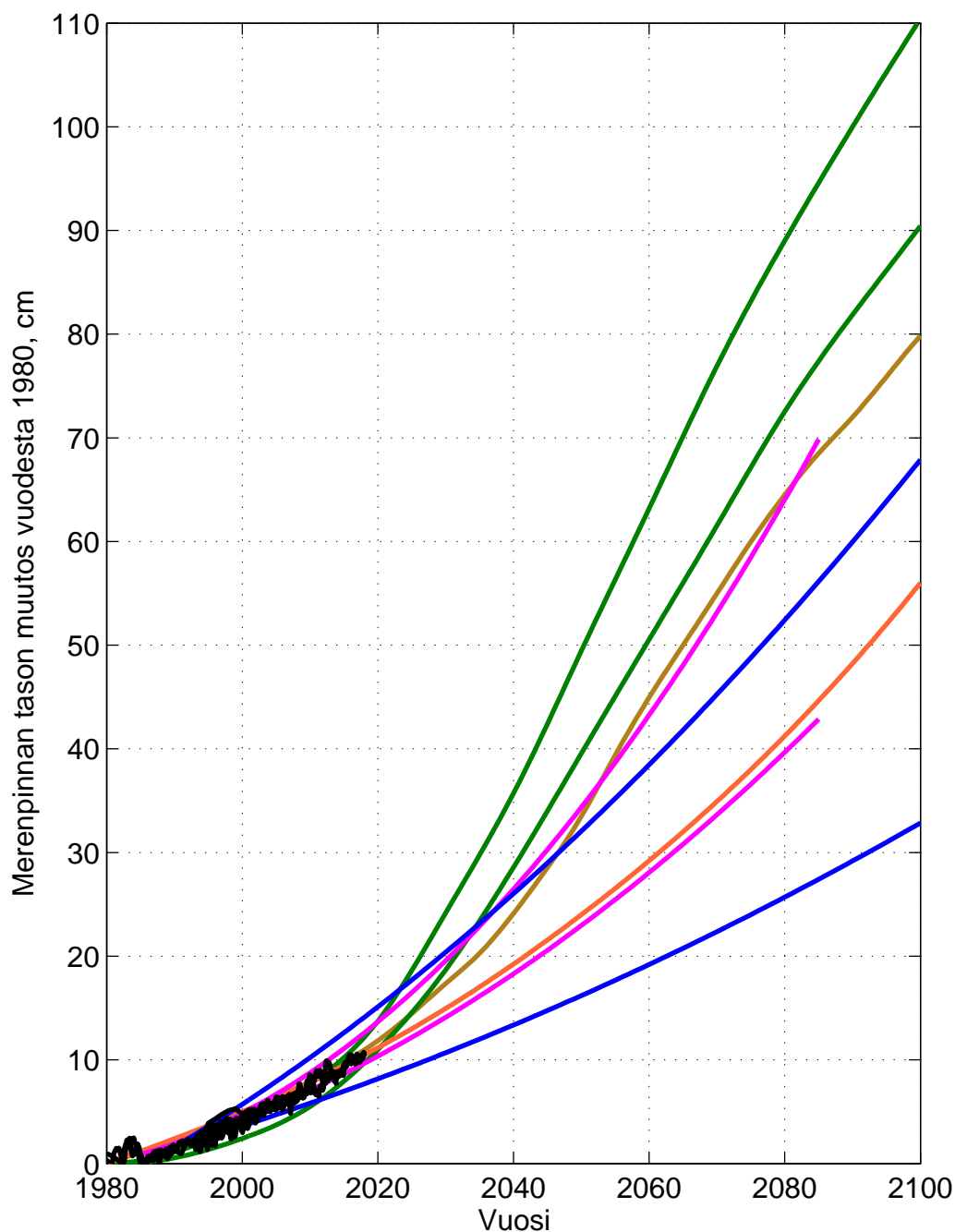
Kuva 5.8: Tekijöittäin arvioidut skenaariot, ryhmä 2 (Hoffman, 1984; Thomas, 1987; Oerlemans, 1989; Warrick ja Oerlemans, 1990). Skenaariot ja toteutunut merenpinnan nousu vuoteen 2050 asti. Thomas (1987): tummanvihreä, Hoffman (1984): oranssi, Oerlemans (1989) : keltainen, Warrick ja Oerlemans (1990): sininen



## 5.3 Parhaimmat osuvuudet

Kuvaan 5.9 on valittu kaikista skenaarioista parhaiten toteutunutta merenpinnan nousua kuvaavat skenaariot. Kuvassa on esitetty Warrick ja Oerlemans (1990) keski- ja alaskenaario, Robin (1986) keskiskenaario, Hoffman (1984) alaskenaario ja Hekstra (1986) skenaariot. Lisäksi kuvaan on otettu Thomas (1987) ylempi alaskenaario ja keskiskenaario, vaikka niissä on havaittavissa erilaista nousunopeuden kasvua, kuin toteutuneessa merenpinnan nousun käyrässä. Kaikki parhaimmat skenaariot edustavat erityyppisiä merenpinnan noususkenaariota. Artikkelin Robin (1986) skenaario on semi-empiirinen, kun taas artikkelin (Hekstra, 1986) skenaariot perustuvat luonnollisen perustrendin ja ihmisen aiheuttaman kiihtyvän osan arviointiin. Artikkelin Hoffman (1984) skenaario perustuu meriveden lämpölaajenemisen ja jäätiköiden sulannan väliin suhteeseen. Raportissa Warrick ja Oerlemans (1990) eli IPCC:n ensimmäisessä arviointiraportissa esitetyt skenaariot perustuvat merenpinnan nousun osatekijöiden arviointiin. Arviointiin on kerätty tietoa useasta eri tutkimuksesta. Toteutunut merenpinnan nousu osuu viimeksi mainitussa tapauksessa keskiskenaarion ja alaskenaarion väliin, joten molemmat skenaariot on esitetty kuvassa. Merenpinnan nousu osuu myös artikkelissa Thomas (1987) annetun keskiskenaarion ja ylemmän alaskenaarion väliin, myös nämä perustuvat eri osatekijöiden arviointiin.

Kuvasta nähdään, että parhaiten vuoteen 2108 asti tapahtuneeseen merenpinnan nousuun osuvat skenaariot ennustavat merenpinnan nousevan 33–110 cm vuoteen 2100 mennessä. Alaraja on raportin Warrick ja Oerlemans (1990) skenaario ja yläraja on Thomas (1987) skenaario. Nousuväli on huomattavasti kapeampi, kuin kaikkien käsiteltyjen skenaarioiden nousuväli 20–345 cm, mutta on edelleen laaja. Viimeisin vuonna 2013 julkaistu IPCC raportti (Church et al., 2013) arvioi merenpinnan nousun vuoteen 2100 mennessä osuvan välille 28–98 cm vuosien 1986–2005 keskiarvoon nähden. Vuoden 1980 tasoon siirrettynä nousuväli arvio olisi suunnillen neljä senttiä korkeampi. Parhaimmaksi valitut 1980-luvun skenaariot ja uusimman IPCC raportin skenaariot ennustavat hyvin samankokoista nousua vuodelle 2100. IPCC tiedeyhteisön muodostamat skenaariot ovat synteetiskenaariota, joihin kulminoituu sen hetkinen paras tieto. Parhaimpien 1980-luvun skenaarioiden osuminen samalle nousuvälille tuo lisää uskottavuutta jo ennestään luotettaville skenaarioille.

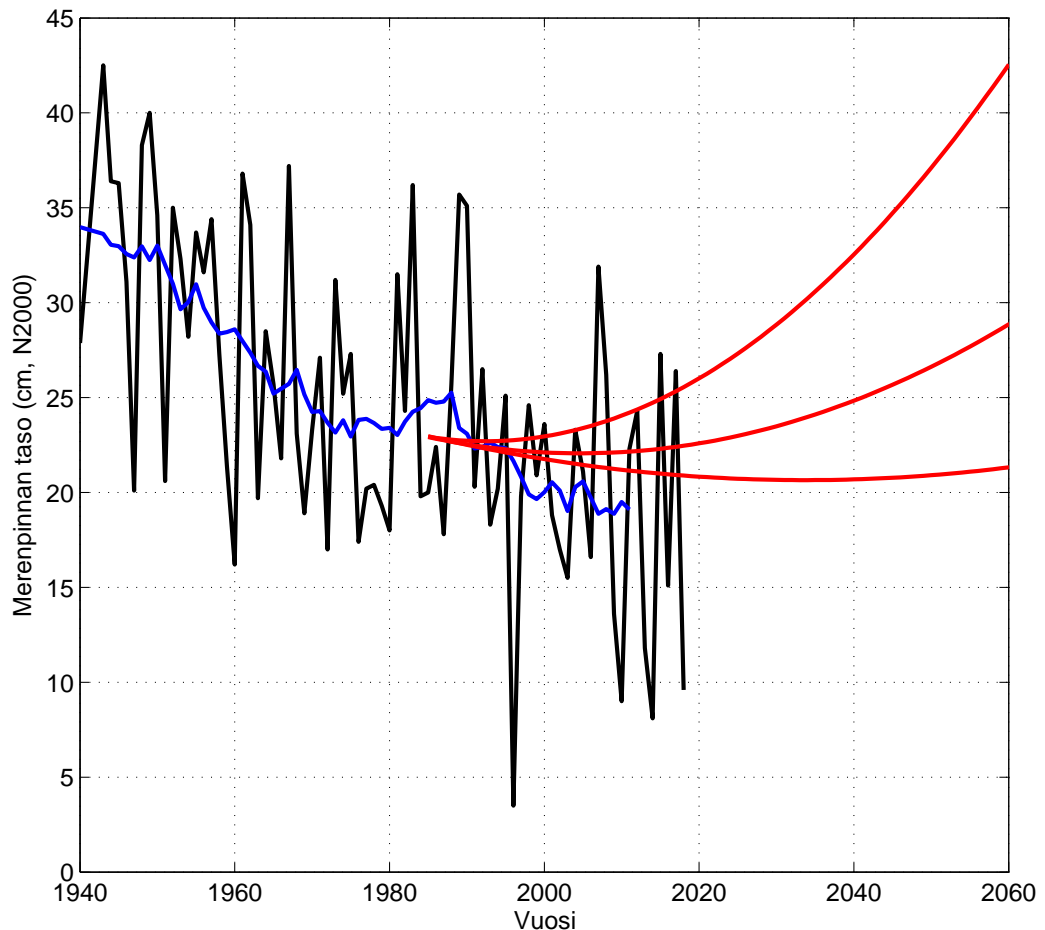


Kuva 5.9: Merenpinnan noususkenaariot ja toteutunut merenpinnan nousu vuoteen 2100 asti. Hekstra (1986) skenaariot: magenta, Thomas (1987) ylempi alaskenaario ja keskiskenaario: tummanvihreä, Robin (1986) keskiskenaario: ruskea, Hoffman (1984) alaskenaario: oranssi, Warrick ja Oerlemans (1990) keski- ja alaskenaario: sininen

## 5.4 Itämeren merenpinnan noususkenaariot

Kappaleessa 2.2 tuotiin esille Itämeren erilaisuus valtameriin verrattuna. 1990-luvulla Suomen rannikon vedenkorkeuden tulevaisuuden arviointiin on käytetty IPCC 1990 raportin Warrick ja Oerlemans (1990) merenpinnan noususkenaarioita. Itämerelle ske-

naarioita sovellettaessa on kuitenkin otettu huomioon paikkakohtainen keskiveden muutos. Silloisen Merenutkimuslaitoksen vuonna 1992 tekemä ennuste (Kahma, 1992) Hangon mareografipaikalle, on esitetty kuvassa 5.10. Kuvassa esitetään lisäksi Hangon vedenkorkeuden vuosittaiset keskiarvot sekä vedenkorkeushavaintojen 15 vuoden liukuva keskiarvo. Kuvasta nähdään, että Hangossa vedenkorkeushavaintojen liukuva keskiarvo on laskenut noususkenaarioiden alapuolelle. Vuonna 2011 merenpinnan noususkenaariot ovat 2–5 cm vedenkorkeushavaintojen yläpuolella. Vaikka keskiarvo on laskenut ennusteen alapuolelle, nähdään laskun viime vuosina tasoittuneen. Tällöin merenpinnan nousu, maankohoaminen ja pitkäaikainen meteorologisten tekijöiden aiheuttama muutos Itämeren kokonaisvesimäärässä ovat tasapainossa. Merenpinnan nousun kiihtyessä ja maanpinnan kohoamisen pysyessä vakiona, on oletettavaa, että Hangossa vedenkorkeuden liukuva keskiarvo alkaa lähitulevaisuuden jälkeen nousta.



Kuva 5.10: IPCC 1990 –raportin (Warrick ja Oerlemans, 1990) merenpinnan noususkenaarioiden perusteella tehdyt ennusteet merenpinnan kehityksestä Hangossa (Kahma, 1992) vuoteen 2060 asti, sekä Hangon vedenkorkeushavaintojen vuosikeskiarvot ja 15 vuoden liukuva keskiarvo. Ennusteet on esitetty punaisella, vuosikeskiarvot on esitetty mustalla ja liukuva keskiarvo on esitetty sinisellä.

Nykyisin merenpinnan pitkän ajan ennusteita tehdessä käytetään laajempaa kirjoa eri skenaarioita. Skenaariot käsitellään huomioimaan paikalliset ominaispiirteet. Tämän jälkeen eri painokertoimilla painotetuista skenaariosta muodostetaan todennäköisyysjakauma. Painottamisen avulla hyväksi todettujen noususkenaarioiden vaikutusta voidaan korostaa ja merenpinnan nousun todennäköisyysjakautaa tarkentaa. Viimeisimmässä julkaisussa IPCC:n edellisen arviontiraportin (Church et al., 2013) synteesiskenaarioita pidettiin kaikista luotettavimpina. (Pellikka et al., 2018)



## Johtopäätökset

Tässä työssä tarkasteltiin kahdeksasta eri lähdeartikkelista tai raportista kerättyjä merenpinnan noususkenaariota, jotka on tehty pääosin 1980-luvulla. Työn tavoitteena oli verrata merenpinnan noususkenaarioita vuosien 1980–2018 välillä mitattuun merenpinnan nousuun. Kappaleessa 5 toteutuneen merenpinnan nousun todettiin olevan selvästi koko skenaariojoukon mediaanin alapuolella: vajaa 70% skenaarioista nousi tapahtunutta merenpinnan nousua nopeammin. Vuonna 2018 globaali merenpinta oli noussut vuoden 1980 tasosta noin 10 cm, tällöin merenpinnan noususkenaarioiden keskiarvo oli noin 6 cm toteutuneen merenpinnan nousun yläpuolella. Myös Suomen rannikolla, Hangossa, 1990-luvulla käytetyt merenpinnan noususkenaariot olivat muutama senttimetrin tapahtuneen merenpinnan muutoksen yläpuolella. Suomen rannikolle tällöin sovelletut skenaariot olivat IPCC:n ensimmäisestä arviointiraportista. Noususkenaariota sovellettaessa oli otettu huomioon keskiveden tason vuosittainen muutos. Vaikka merenpinnan nousua Suomen rannikolla hieman yliarvioitiin, on maltillinen merenpinnan nousun yliarviointi rannikkorakentamisen kannalta turvallisempaa kuin merenpinnan nousun aliarviointi.

Tässä työssä tarkasteltiin ääri- ja keskiskenaarioiden osuvuutta globaaliin merenpinnan nousuun nähden. Kaikki alaskenaariot olivat toteutuneen merenpinnan nousun alapuolella ja kaikki yläskenaariot olivat toteutuneen merenpinnan nousun yläpuolella. Suurimpia yläskenaarioita voidaan pitää selkeästi yliarvioina, sillä ne vaativat toteutuakseen nopeampaa merenpinnan nousun kiihtymistä, kuin missään lähdeartikkelissa on ennustettu. Todennäköisintä globaalia nousua kuvaavista keskiskenaariosta 64% nousi nopeammin kuin toteutunut merenpinnan nousukäyrä. Loput skenaariosta nousivat suunnilleen samaa tahtia toteutuneen merenpinnan nousun kanssa. Kes-

kiskenaarioiden ennustama merenpinnan nousuväli on vuonna 2100 laaja, 66<sup>1</sup>–217 cm.

Merenpinnan noususkenaariot jaettiin myös ryhmiin niiden tekotavan perusteella. Pääryhmät olivat semi-empiiriset skenaariot ja tekijöiden yksittäiseen arviointiin perustuvat skenaariot. Jälkimmäisessä ryhmässä oli erikseen käsitelty perustrendiin ja kiihtyvään nousuun jaotellut skenaariot. Sekä semi-empiiristen, että osatekijöittäin arvioitujen skenaarioiden osuvuudet vaihtelivat paljon. Lyhyessä ajassa tapahtuneesta pienestä ja hyvin tunnetusta ilman lämpötilan noususta johdetut semi-empiiriset merenpinnan nousuennusteet osuivat hyvin kohdalleen. Suureen ja epävarmaan ilman lämpötilan nousuun perustuvat semi-empiiriset skenaariot selkeästi yliarvioivan merenpinnan nousua. Tulos tuo uskottavuutta nykyisille, lähiaikoja ennustaville semi-empiirisille skenaariolle, joilla lähtökohtana on samankaltainen tunnettu ilman lämpötilan nousu kuin lähdeartikkelissa Robin (1986). Pitkässä aikaskaalassa merenpinnan nousuun vaikuttavat prosessit voivat kuitenkin muuttua, jolloin lyhyen ajanjakson lämpötilanmuutokseen perustuvat semi-empiiriset skenaariot eivät välttämättä enää päde. Osatekijöittäin arvioiduista skenaarioista suurta diffuusiokerrointa käyttävät skenaariot vaikuttivat yliarvioivan merenpinnan nousua. Kappaleessa 5 tarkasteltiin parhaiten vuosien 1980–2018 merenpinnan nousua kuvaavia skenaarioita. Kaikki parhaiten osuvat skenaariot oli toteutettu eri menetelmillä, joten tarkastelun perusteella ei voida esittää paremmuusjärjestystä erilaisille menetelmille. Näin myöskään menetelmäkohtaisia painotussuosituksia ei tämän työn perusteella voida Suomen rannikon nousuennusteisiin antaa, koska tulosten perusteella eri menetelmillä tehdyt skenaariot eivät eroa osuvuudessa merkittävästi. Sekä semi-empiirisistä että komponentteittain arvioiduista skenaariosta löytyy niin hyvin kuin huonosti toteutunutta merenpinnan nousua kuvaavia skenaarioita, joten tekomenetelmää tärkeämpää on tietää tehdyt taustaoletukset menetelmän takana. Parhaiten osuvat skenaariot ennustavat samalaista merenpinnan nousun tasoa vuodelle 2100, kuin viimeisimmän IPCC raportin (Church et al., 2013) skenaariot. Näiden skenaarioiden osuminen samalle nousuvälille tuo lisää uskottavuutta jo ennestään luotettaville synteesiskenaarioille.

---

<sup>1</sup> Alin skenaario päättyy 2085, se ennustaa 43 cm merenpinnan nousun vuodelle 2085

# Kirjallisuusviitteet

- Andersson, H. C., 2002: Influence of long-term regional and large-scale atmospheric circulation on the baltic sea level. *Tellus A*, **54**(1), 76–88.
- Church, J., P. Clark, A. Cazenave, J. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M. Merri-field, G. Milne, R. Nerem, P. Nunn, A. Payne, W. Pfeffer, D. Stammer ja A. Unnikrishnan, 2013: *Sea Level Change*, book section 13, ss. 1137–1216. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. ISBN ISBN 978-1-107-66182-0.
- Church, J. A. ja N. J. White, 2011: Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Surveys in Geophysics*, **32**(4), 585–602.
- Defant, A., 1961a: *Physical Oceanography*, osa 1, s. 729. Pergamon Press, Oxford, London, New York, Paris.
- Defant, A., 1961b: *Physical Oceanography*, osa 2, s. 598. Pergamon Press, Oxford, London, New York, Paris.
- Denness, B., 1987: Sea-level modelling: The past and the future. *Progress in Oceanography*, **18**, 41–59.
- Gornitz, V., S. Lebedeff ja J. Hansenn, 1982: Global sea level trend in the past century. *Science*, **215**, 1611–1614.
- Hansen, J., D. Johnson, A. Lacis, S. Lebedeff, P. Lee, D. Rind ja G. Russell, 1981: Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide. *Science*, **213**, 957–966.
- Hekstra, G., 1986: Will climate changes flood the netherlands? effects on agriculture, land use an well-being. *Ambio*, **15**(6), 316–326.
- Hela, I., 1948: On the stress of the wind on the water surface. *Geophysica*, **3:1**, 146–161.
- Hoffman, J., 1984: *Estimates of future sea level rise*, osa 15(6), ss. 79–103. Van Nostrand Reinhold Comp.

- IOC, SCOR ja IAPSO, 2010: *The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties*. Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO (English).
- Jevrejeva, S., J. C. Moore, A. Grinsted ja P. L. Woodworth, 2008: Recent global sea level acceleration started over 200 years ago? *Geophysical Research Letters*, **35**(8).
- Johansson, M., 2014: Sea level changes on the finnish coast and their relationship to atmospheric factors. *Finnish Meteorological Institute Contributions*, **109**, 132.
- Johansson, M. ja K. Kahma, 2016: On the statistical relationship between the geostrophic wind and sea level variations in the baltic sea. *Boreal Environment Research*, **21**, 25–43.
- Johansson, M., H. Boman, K. Kahma ja J. Launiainen, 2001: Trends in sea level variability in the baltic sea. *Boreal Environment Research*, **6**, 159–179.
- Johansson, M., H. Pellikka, K. Kahma ja K. Ruosteenoja, 2014: Global sea level rise scenarios adapted to the finnish coast. *Journal of Marine Systems*, **129**, 35–46.
- Kahma, K., 1992: Ilmastomuutos alkaa näkyä vedekorkeushavainnoissa. *Merentutkimuslaitos Toimintakertomus*, ss. 14–15.
- Kahma, K., P. Alenius, H. Boman ja I. Vuorinen, 1990: Meriveden korkeus, aallokko, lampotila, suolaisuus ja biologinen kasvusto loviisan rannikolla seuraavien 20 – 50 vuoden aikana. *Merentutkimuslaitos*.
- Kahma, K., H. Pellikka, K. Leinonen, U. Leijala ja M. Johansson, 2014: *Pitkän aikavälin tulvariskit ja alimmat suositeltavat rakentamiskorkeudet Suomen rannikolla*, osa 2014:6. Ilmatieteen laitos, raportit.
- Levitus, S., J. I. Antonov, T. P. Boyer, O. K. Baranova, H. E. Garcia, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, J. R. Reagan, D. Seidov, E. S. Yarosh ja M. M. Zweng, 2012: World ocean heat content and thermocline sea level change (0–2000 m), 1955–2010. *Geophysical Research Letters*, **39**(10).
- Lisitzin, E., 1962: Some characteristics of the variation in the water volume in the baltic as a function of air pressure gradient changes. *SOCIETAS SCIENTIABTTM FENNICA COMMENTATIONES PHYSICO - MATHEMATICAE*, **XXVI**(9), 1–15.
- Lisitzin, E., 1974: Sea-level changes.
- Medvedev, I., A. Rabinovich ja E. Kulikov, 2013: Tidal oscillations in the baltic sea. *Oceanology*, **53**, 526–538.



- Meier, M. F., 1984: Contribution of small glaciers to global sea level. *Science*, **226**(4681), 1418–1421.
- Meier, M. F., M. B. Dyurgerov, U. K. Rick, S. O’Neel, W. T. Pfeffer, R. S. Anderson, S. P. Anderson ja A. F. Glazovsky, 2007: Glaciers dominate eustatic sea-level rise in the 21st century. *Science*, **317**(5841), 1064–1067.
- Mitrovica, J., E. Tamisiea, J. Davis ja G. Milne, 2001: Recent mass balance of polar ice sheets inferred from patterns of global sea-level change. *Nature*, **409**, 1026–9.
- Nerem, R. S., B. D. Beckley, J. T. Fasullo, B. D. Hamlington, D. Masters ja G. T. Mitchum, 2018: Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **115**(9), 2022–2025.
- Oerlemans, J., 1989: A projection of future sea level. *Climate change*, **15**, 151–174.
- Pellikka, H., U. Leijala, M. M. Johansson, K. Leinonen ja K. K. Kahma, 2018: Future probabilities of coastal floods in finland. *Continental Shelf Research*, **157**, 32–42.
- Revelle, R., 1983: *A projection of future sea level*. The National Academies Press.
- Rhein, M., S. Rintoul, S. Aoki, E. Campos, D. Chambers, R. Feely, S. Gulev, G. Johnson, S. Josey, A. Kostianoy, C. Mauritzen, D. Roemmich, L. Talley ja F. Wang, 2013: *Observations: Ocean*, book section 3, s. 255–316. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. ISBN ISBN 978-1-107-66182-0.
- Robin, G. d., 1986: *Changing the sea level*. Wiley.
- S. Averkiev, A. ja K. A. Klevanny, 2010: A case study of the impact of cyclonic trajectories on sea-level extremes in the gulf of finland. *Continental Shelf Research - CONT SHELF RES*, **30**, 707–714.
- Shine, K., R. Derwent, D. Wuebbles ja J.-J. Morcrette, 1990: Radiative forcing of climate. *IPCC AR1, Scientific Assessment of Climate Change*, ss. 45–67.
- Simpson, M. J. R., K. Breili ja H. P. Kierulf, 2014: Estimates of twenty-first century sea-level changes for norway. *Climate Dynamics*, **42**(5), 1405–1424.
- Slangen, A. B. A., M. Carson, C. A. Katsman, R. S. W. van de Wal, A. Köhl, L. L. A. Vermeersen ja D. Stammer, 2014: Projecting twenty-first century regional sea-level changes. *Climatic Change*, **124**(1), 317–332.

- Tamisiea, M. E., J. X. Mitrovica, J. L. Davis ja G. A. Milne, 2003: *Long Wavelength Sea Level and Solid Surface Perturbations Driven by Polar Ice Mass Variations: Fingerprinting Greenland and Antarctic Ice Sheet Flux*, ss. 81–93. Springer Netherlands, Dordrecht. ISBN 978-94-017-1333-7.
- Thomas, R. H., 1987: Future sea-level rise and its early detection by satellite remote sensing. *Progress in Oceanography*, **18**, 23–40.
- Vaughan, D., J. Comiso, I. Allison, J. Carrasco, G. Kaser, R. Kwok, P. Mote, T. Murray, F. Paul, J. Ren, E. Rignot, O. Solomina, K. Steffen ja T. Zhang, 2013: *Observations: Cryosphere*, book section 4, s. 317–382. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. ISBN 978-1-107-66182-0.
- Warrick, R. ja J. Oerlemans, 1990: Sea level rise. *IPCC AR1, Scientific Assessment of Climate Change*, ss. 260–281.
- Wigley, T. ja S. Raper, 1987: Thermal expansion of sea water associated with global warming. *Nature*, **330**, 127–131.
- Witting, R., 1911: Tidvattnen i östersjön och finska viken. *Fennia*, **29**.
- Wubber, C. ja W. Krauss, 1979: The two-dimensional seiches of the baltic sea. *Oceanologica Acta*, **2**(4), 435–446.